№2 2022 [64]
+0

научно-технический журнал

# Известия

## ИНСТИТУТА ИНЖЕНЕРНОЙ ФИЗИКИ

Устойчивым
курсом
ТОЛЬКО ВПЕРЕД!

27 апреля
День основания Института
инженерной физики

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

## В НОМЕРЕ


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

2 **Коломбет В.А., Панчелюга В.А., Лесных В.Н.**
Самовоспроизводящиеся автоматы во вселенной: жизнь, универсальная система утраивающихся периодов, фундаментальные взаимодействия

5 **Коробков А.А., Кулик М.В., Садекова А.А., Сергеев С.С., Смородин А.И.**
Анализ альтернативных конструктивных схем воздушных испарителей и путей повышения их эффективности

11 **ПорядинаД.А.,КучменкоТ.А.,БузакинИ.С., Грибоедова И.А., Карлов П.А.**
Применение пьезокварцевых микровесов для экспрессного внелабораторного определения фактических смол в дизельных топливах

15 **Коршунов М.А., Шолохов А.В.**
Использование цифровой карты дорог для начальной выставки автономных систем наземной навигации

### РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

20 **Зеленевский В.В., Зеленевский Ю.В., Попов А.В., Егоров В.В., Наконечный А.Б.**
Математическая модель имитозащищенного канала передачи данных стеганографическими способами

24 **Чиров Д.С., Рюмшин К.Ю., Атакищев О.И., Кочетков Ю.А.**
Алгоритм и результаты моделирования процесса обработки сигналов в многопозиционной радиолокационной станции обнаружения беспилотных летательных аппаратов

35 **Рюмшин К.Ю., Атакищев О.И., Амелёнков А.А., Журавлёв А.П.**
Алгоритм фазирования при демодуляции фазоманипулированных сигналов и сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией . 35

40 **Бродский М.С., Звонарёв В.В., Попов А.С.**
Методика расчета числа повторений в радиоканале систем передачи сообщений с обратной связью, функционирующих в условиях воздействия мультипликативной помехи

43 **Звонарёв В.В., Попов А.С., Худик М.Ю.**
Методика расчёта энергетического запаса радиолинии для медианных и средних значений мощности сигнала

### ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

50 **Вершинин Е.В., Фёдорова В.А., Ткаченко А.В.**
Эффективность интеллектуальных методов классификации при прогнозировании сердечно-сосудистых заболеваний

56 **Колебцев В.И., Белов Ю.С., Зеленцова Е.В.**
Разработка и анализ результатов работы сервиса рекомендации новостей

61 **Колпаков Д.М., Вершинин Е.В., Зеленцова Е.В.**
Расчет маски облаков по изображениям предварительного просмотра мультиспектральных спутниковых снимков

64 **Мазин А.В., Гайфулин В.В., Чудин К.С., Ходырев Т.Б., Тегенцев И.М.**
Теория информации как методологическая основа решения проблем адекватной оценки возможностей по обеспечению защиты информации

69 **Рассохин Г.Н., Кондаков С.Е.**
Способ построения хорды искомого угла при трисекции заданного

73 **Крахмалёв Д.В., Демидов Л.Н., Данилов В.П.**
Разработка реконфигурируемой структуры высоконагруженных вычислительных систем

78 **Васильев В.В., Крекнин А.В.**
Методика и программа проектного анализа и оптимизации авиационных конструкций крыльевого типа

83 **Смуров С.В., Волков Г.Г.**
О разрешении SL(2,C)-сингулярностей в аффинных и торических проективных пространствах

### ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И РОБОТОТЕХНИКА

92 **Михайлов Ю.Ф., Назаренко А.В.**
Разработка модели учета влияния эмоций на формирование индивидуальной траектории обучения студента на основе нейросетевых технологий

### СОВРЕМЕННАЯ МЕДИЦИНА И ФАРМАЦЕВТИКА

97 **Ермаков А.М., Царькова Е.А., Антонова О.Ю., Каменских К.А., Кочеткова О.Ю., Колманович Д.Д.**
К вопросу о радиопротекторных свойствах препарата Тамерон

101 **AUTHORS**

103 **ЭТИКА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ**

104 **ТРЕБОВАНИЯ К АВТОРАМ СТАТЕЙ**


**Научно-технический журнал**

**ИЗВЕСТИЯ**
**Института инженерной физики**
№2 (64) 2022

Издается с апреля 2006 г. Выходит ежеквартально

**ISSN 2073-8110**
Включен в «Перечень ВАК»
по научным специальностям:
2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы
2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций
2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации
2.3.6. Методы и системы защиты информации, информационная безопасность

Главный редактор,
председатель редакционного совета
и редакционной коллегии

**Алексей Николаевич Царьков**
*Президент – 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
№ 2 2022
64

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, профессор*

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## Алексей Николаевич Царьков

Президент Института –
Председатель Правления Института
заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук,
профессор,
Почетный гражданин
города Серпухова

**Дорогие друзья! Уважаемые коллеги!**

27 апреля мы будем отмечать очередной день рождения Института инженерной физики – 29 лет. Примите в связи с этим самые искренние и теплые поздравления!

Наш Институт – это 970 высокопрофессиональных сотрудников, среди которых 28 докторов наук, 102 кандидата наук, 27 профессоров, 89 доцентов, 41 заслуженный деятель науки РФ и почетный работник РФ, 4 лауреата Государственной и премий Правительства РФ. Наш Институт – это специальный диссертационный совет по двум научным специальностям. Наш Институт – это мощная материально-техническая база: центральный научный, учебно-производственный, технологический, испытательно-производственный корпуса (площадью более 10000 кв.м), научно-технологический производственный комплекс (6350 кв.м), арендуемые здания и помещения (более 3000 кв.м). Наш Институт – это высококлассное технологическое оборудование. Гарантиями нашей деятельности и качества выпускаемой продукции служат 28 лицензий, 3 сертификата, 4 аттестата, 7 свидетельств, 298 патентов, 52 свидетельства о регистрации программ для ЭМВ.

В 2001 году Институт аккредитован Министерством промышленности, науки и технологий РФ; в 2013 году – Министерством образования и науки РФ; в 2019 году – Федеральной службой по надзору в сфере образования и науки.

Что касается достижений только за прошедший год, то Институт признан одним из «100 лучших предприятий России» и получил Сертификат соответствия государственного образца, подтверждающий включение в Единый реестр «Инновация и развитие». Институт включен в Реестр единственных поставщиков российских вооружения и военной техники; вошел в Перечень системообразующих предприятий Московской области; получил сертификат участника Военного инновационного Технополиса «ЭРА», что дает возможность продолжать совместно с коллегами из Технополиса научно-исследовательскую и опытно-конструкторскую деятельность в интересах обеспечения обороноспособности государства.

Важнейшим итогом деятельности нашего фармацевтического производства стало успешное завершение государственной экспертизы и получение регистрационного удостоверения на лекарственный препарат (ЛП) «ТАМЕРОН», внесение в Государственный реестр лекарственных средств активной фармацевтической субстанции «Аминодигидрофталазиндион натрия» и ЛП «ТАМЕРОН».

Мы открыли Технопарк в сфере высоких технологий «Научно-технологический и фармацевтический производственный комплекс» (ТехноИнноватика) для развития инновационных научных направлений деятельности наших ученых и инженеров и расширения производственных мощностей.

Институт продолжает улучшать качество и расширять перечень услуг организациям и частным лицам в области телефонии, IP-телевидения, Интернета, систем теле-, видеонаблюдения, ограничения доступа, охранно-пожарных сигнализаций, электроизмерительных исследований.

От всей души желаю всему нашему сплоченному коллективу здоровья, благополучия, счастья, успехов, дальнейшей реализации научного и творческого потенциала, воплощения в жизнь всех задуманных планов и проектов, направленных во благо нашей Родины – великой России!

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

# САМОВОСПРОИЗВОДЯЩИЕСЯ АВТОМАТЫ ВО ВСЕЛЕННОЙ: ЖИЗНЬ, УНИВЕРСАЛЬНАЯ СИСТЕМА УТРАИВАЮЩИХСЯ ПЕРИОДОВ, ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

# SELF-REPRODUCING AUTOMATA IN THE UNIVERSE: LIFE, UNIVERSAL PERIOD-TRIPLING SYSTEM, FUNDAMENTAL INTERACTIONS

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

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

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

**Аннотация**

Биосфера Земли возникла в результате работы самовоспроизводящегося автомата, удваивающего генетический материал, представленный в форме молекулярных текстов. Мы нашли вероятный след работы также и второго самовоспроизводящегося автомата. Этот след проявился в форме системы утраивающихся периодов всевозможных процессов, дотянувшейся до космологического масштаба времени, стартовав из ультрамикроскопического, возможно, даже от планковского масштаба. Мы предполагаем, что существуют также автоматы третьего типа, которые проявляются как известные фундаментальные физические взаимодействия: гравитационное, слабое, сильное и электромагнитное. Смены поколений различных частных форм автомата третьего типа приводят к частицам-переносчикам соответствующих взаимодействий. Есть основания предположить, что этот тип эволюции автомата запускается массивными частицами холодной темной материи.

**Ключевые слова:** автомат фон Неймана, самовоспроизводящийся автомат, универсальная система утраивающихся периодов, итерации, физические взаимодействия.

**Summary**

The biosphere of the Earth arose as a result of the work of a self-reproducing automaton, doubling the genetic material presented in the form of molecular texts. We have found a probable trace of the work of the second self-reproducing automaton as well. This trace manifested itself in the form of the tripling periods system, which starting from the ultramicroscopic, perhaps even from the Planck scale and reaching the cosmological time scale. We assume that there are also automata of the third type, which manifest themselves as known fundamental physical interactions: gravitational, weak, strong and electromagnetic. Changes in generations of various particular forms of the automaton of the third type lead to particles-carriers of the corresponding interactions. There is reason to believe that this type of automaton evolution is triggered by massive particles of cold dark matter.

**Keywords:** von Neumann automaton, self-reproducing automaton, universal periods-tripling system, iterations, physical interactions.

Биосфера Земли возникла в результате работы самовоспроизводящегося автомата (так называемого автомата фон Неймана [1]), занятого удвоением генетического материала в форме молекулярных текстов. Известно, что с момента Большого Взрыва (13,8 млрд. лет тому назад) до момента возможности появления этих текстов произошла серия взрывов сверхновых звезд, обогатившая протосолнечную межзвездную среду химическими элементами в количестве, достаточном для возникновения и эволюции молекулярных текстов. Так как жизнь на Земле

**Таблица 1**

Спектр рекуррентных формул (отображений) для фундаментальных взаимодействий, связывающих между собой массы субатомных частиц [21]

| k | Отображение | Неподвижная точка | | Спин |
|---|---|---|---|---|
| | | Переносчик | Масса (Гэв/с²) | |
| -3 | $y_n = C^{3/k} / y_{n+1}^{3*k}$ | $\eta^o$ ? | 0,55 0 | 0 |
| -2 | | Z'? ? | 10000 0 | 1 |
| -1 | | ? g | $10^{33}$ 0 | 2 |
| 0 | $y_n = y_{n+1}/K$ | $\gamma$ $\phi^o$ ? | 0 1,02 20,5 | 1,1,1? |
| 1 | $y_n = C^{3/k} / y_{n+1}^{3*k}$ | ? ? | $10^{15}$ | 2 |
| 2 | | $W^{\pm}$ $Z^o$ | 81 | 1 |
| 3 | | $\pi^{\pm}$ $\pi^o$ | 0,137 | 0 |

возникла ~3,5 млрд. лет тому назад, на это ушло практически 10 млрд. лет. Поначалу доминировала исходная форма автомата, но в результате ошибок при воспроизведении текстов возникли различные (мутантные) версии автомата. В условиях дефицита молекулярных ресурсов коэффициент размножения исходного автомата уменьшился с двойки до единицы, и тогда стала возможной конкуренция различных версий автомата, т.е. возникла биологическая эволюция и, в конце концов, современная биосфера [1-18].

В своих работах 2016-2021 гг. мы описали возможный след работы второго автомата фон Неймана [19,20]. Он проявился в форме так называемой универсальной системы утраивающихся периодов (УСУП) всевозможной природы. Она протянулась от микроскопического (возможно, от планковского) масштаба времени до космологического. Мы предположили, что как биологический автомат создал биосферу, так и автомат УСУП мог создать всю вселенную. У этого автомата коэффициент размножения оказался тройкой во всех исследованных масштабах времени. Несмотря на появление множества мутантных версий этого автомата, конкуренции с исходной версией самовоспроизводящегося автомата не наблюдается, т.к. коэффициент размножения не уменьшается, а остается тройкой. Мутантные версии существуют лишь как примесь. (Возможно, что тщательные измерения отклонения коэффициента размножения от тройки помогут оценить истинный размер постинфляционной вселенной). Для описания спектра наблюдаемых периодов $Tn,m$ используется формула С. Петца: $Tn,m=T0\cdot 3n/2m$. Здесь $T0=114{,}6$ лет, $n$ – номер поколения, $m$ – эффективное число мутаций. Для действующего в аналогичном режиме биологического автомата (например, клеточной культуры) аналогом формулы Петца является формула для массы $Mn,m=M0\cdot 2n/2m$, где $M0$ – масса клетки, а $m$ – разность между количеством вставочных (избыточных, дополнительных) поколений и количеством пропусков поколений. В рекуррентном виде, связывающем соседние поколения, приведенные формулы выглядят как $Mn+1=2Mn$ и $Tn+1=3Tn$.

Третий тип кандидатов в автоматы фон Неймана могут представлять собой фундаментальные физические взаимодействия: гравитационное, слабое, сильное и электромагнитное (см. наши работы с 1981 по 1986 гг. [21-23]). Там мы поставили физическим полям в соответствие рекуррентные формулы (см. *таблицу 1*), связывающие массы субатомных частиц. Смысл этой рекуррентности оставался в значительной степени неясным.

В *таблице 1* $C=1{,}51\times 1016$, $n$ – по-прежнему номер поколения, а величины $y=(m/me)2/3$ позволяют вычислять массы $m$ соответствующих субатомных частиц. Величины $y$-*1* – это вероятности, близкие по физическому смыслу к знаменитой константе электромагнитного взаимодействия 1/137. Целочисленный параметр $k$ различает фундаментальные взаимодействия: $|k|=0,1,2$ и 3 отвечают электромагнитным, гравитационным, слабым и сильным взаимодействиям. Параметр $K$ – частная особенность электромагнитного взаимодействия [21,24,25].

Перемещение проблемы рекуррентности в контекст автоматов фон Неймана создаёт новые возможности интерпретации. Например, оставалось неясным, почему в этих рекуррентных формулах именно неподвижные точки отвечают массам частиц-переносчиков взаимодействий. С новой позиции становится ясным, что в этих точках работа самовоспроизводящегося автомата деградирует к единичному коэффициенту размножения, к точному самовоспроизведению,

что, как видно из примера биологического автомата фон Неймана, отвечает возникновению эффективной конкуренции альтернативных версий автомата, т.е. возникновению в чисто физическом явлении некоего нового аналога биологической эволюции. (Кстати, из особенностей применения формул третьего типа создаётся впечатление, что этот тип эволюции тесно опирается на существование массивных частиц холодной темной материи [25]). Вероятно, при каждом изменении обстоятельств, как и в случае биологии, – например, при частичном вымирании популяции по второстепенным (случайным, сторонним) причинам, – коэффициент размножения переносчиков может сильно возрастать от единичного, компенсируя эти изменения, и затем возвращаться в устойчивое состояние, т.е. в режим точного самовоспроизведения.

Бесспорно, что биологический автомат фон Неймана создал биосферу, и мы давно уже предполагаем, что автомат УСУП мог аналогичным образом создать всю вселенную. Теперь представляется вероятным, что автоматы третьего типа заполнили вселенную обычной материей [24, 25].

**Литература**

1. Нейман Дж. фон. Теория самовоспроизводящихся автоматов. М.: Мир, 1971. 382 с.
2. Langton C. G. Self-replication in cellular automata // Physica D, 1984. №10. Pp.135-144.
3. Byl J. Self-reproduction in small cellular automata // Ibid, 1989. №34. Pp. 295-300.
4. Reggia J. A., Armentrout S. I., Chou H.-H., Peng Y. Simple systems that exhibit self-directed replication // Science, 1993. 259. Pp.1282-1287.
5. Codd E. F. Cellular automata. New York: Academ. Press, 1968. 122 p.
6. Langton C. G. Studying artificial life with cellular automata // Physica D, 1986. №22. Pp.120-149
7. Chou H.-H., Reggia J.A. Emergence of self-reproducing structures in a cellular automata space // Ibid, 1997. №110. Pp.252-276.
8. Azpeitia I., Ibanez J. Spontaneous emergence of robust cellular replicators // Lect. Notes in Comput. Sci., 2002. №2493. Pp.132-143.
9. Stauffer A. , Sipper M. Externally controllable and destructible self-replicating loops // Lect. Notes in Artif. Intel, 2001. №2159. Pp.282-291.
10. Chou H.-H., Reggia J.A. Problem solving during artificial selection of self-replicating loops // Physica D, 1998. №115. Pp.293-312.
11. Petraglio E., Henry J.M., Tempesti G. Arithmetic operations on self-replicating cellular automata // Lect. Notes in Artif. Intel, 1999. №1674. Pp.447-456.
12. Mange D., Stauffer A. , Petraglio E., Tempesti G. Embryonic machines that divide and differentiate // Lect. Notes in Comput. Sci., 2004. №3141. Pp.201-216.
13. Mange D., Stauffer A., Petraglio E., Tempesti G. Self-replicating loop with universal construction // Physica D, 2004. №191. Pp.178-192.
14. Stauffer A., Mange D., Tempesti G. Bio-inspired computing machines with self-repair mechanisms // Lect. Notes in Comput. Sci., 2006. №3853. Pp.128-140.
15. Stauffer A., Mange D., Rossier J. Self-organizing systems based on bio-inspired properties // Lect. Notes in Artif. Intel, 2007. №4648. Pp.1171-1181.
16. Stauffer A., Mange D., Vannel F. Bio-inspired self-organizing cellular systems // Biosystems, 2008. №94, Iss. 1-2. Pp.164-169.
17. Tempesti G., Mange D., Stauffer A. Self-replicating and cellular automata // Encyclopedia of Complexity and Systems Science (Ed. R.A. Meyers). Berlin: Springer-Verlag, 2009. Pp.8066-8084.
18. Ачасова С.М. Самовоспроизводящаяся структура как искусственный многоклеточный организм // Кибернетика и системный анализ, 2014. Т.50. №2.
19. 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.
20. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Елистратов А.В. Трипликатор как механизм формирования универсальной системы утраивающихся периодов // Известия Института инженерной физики, 2020. №4(58). С.5-10.
21. Коломбет В.А. Попытка феноменологического синтеза спектра масс элементарных частиц и спектра безразмерных констант взаимодействий. №2388-86. Деп. (ВИНИТИ, Москва, 1986).
22. Коломбет В.А. О возможности представления масс элементарных частиц и атомных ядер единой системой целых чисел. Препринт. ОНТИ НЦБИ АН СССР, Пущино, 1981.
23. Коломбет В.А. Об аномальных значениях масс элементарных частиц. Препринт. ОНТИ НЦБИ АН СССР, Пущино, 1981.
24. Коломбет В.А. Феноменология субатомных частиц и фундаментальных взаимодействий при взгляде из области низких энергий. Система «Планета Земля». М.: ЛЕНАРД, 2020. С.183-203.
25. Коломбет В.А. Феноменологическая единая теория, указывающая на пару скрытых частиц, возможно являющихся частицами холодной темной материи. Система «Планета Земля»: 25 лет сборнику «Система „Планета Земля“». М.: ЛЕНАНД, 2022. 472 с.

УДК 621.573

# АНАЛИЗ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ СХЕМ ВОЗДУШНЫХ ИСПАРИТЕЛЕЙ И ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ

# ANALYSIS OF ALTERNATIVE CONSTRUCTION SCHEMES OF AIR EVAPORATORS AND WAYS TO INCREASE THEIR EFFICIENCY

Альфия Абдрякибовна Садекова
младший научный сотрудник
научно-методическое управление
МОУ «ИИФ»
Адрес: 119049, Москва, Ленинский пр-т, д. 4
Тел.: +7 (916) 644-72-38
E-mail: tienkiss83@mail.ru

Алексей Александрович Коробков
*почетный работник науки и высоких технологий РФ*
*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

Степан Сергеевич Сергеев
руководитель расчетной группы
ПАО«Криогенмаш»
Адрес: 143907, Московская обл.,
г. Балашиха, пр. Ленина, д. 67
Тел.: +7(495) 505-93-33
E-mail: stepan.sergeev@omzglobal.com

Максим Васильевич Кулик
старший научный сотрудник
научно-методическое управление
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,
Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7 (903) 797-36-67
E-mail: mklik@mail.ru

Анатолий Иванович Смородин
*почетный работник науки и техники РФ*
*доктор технических наук, профессор*
профессор кафедры Э-4
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ)»
Адрес: 107005, г. Москва,
ул. 2-я Бауманская, д. 5
Тел.: +7 (499) 263-61-27
E-mail: smorodin38@rambler.ru

**Аннотация**

В целях решения актуальной проблемы повышения надежности и эффективности малотоннажных СПГ-комплексов в статье представлены результаты анализа способов и установок бесперебойной регазификации СПГ, в том числе результаты:

- сравнительного термодинамического анализа установок газификации криогенных жидкостей с испарителями различных типов;
- анализа возможностей повышения эффективности атмосферных испарителей СПГ панельного типа за счет снижения массогабаритных характеристик;
- анализа возможностей повышения эффективности атмосферных испарителей за счет интенсификации наружного теплообмена.

Показаны особенности работы атмосферных испарителей при математическом описании процессов.

Результаты исследования могут быть использованы при разработке адаптированной методики расчета схем и режимных параметров систем (установок) обеспечения бесперебойной газификации СПГ с учетом надежности и эффективности испарителей.

**Ключевые слова:** атмосферный испаритель, газификационная установка, инеобразование, сжиженный природный газ, теплообмен, термодинамический (эксергетический) анализ, электроиспаритель.

**Summary**

In order to solve the urgent problem of improving the reliability and efficiency of small-scale LNG complexes, the article presents the results of an analysis of methods and installations for uninterrupted LNG regasification, including results:

- of comparative thermodynamic analysis of cryogenic liquid gasification plants with various types of evaporators;
- of the analysis of the possibilities of increasing the efficiency of atmospheric LNG panel-type evaporators by reducing the weight and size characteristics;

• of the analysis of the possibilities of increasing the efficiency of atmospheric evaporators due to the intensification of external heat transfer.

The features of the operation of atmospheric evaporators in the mathematical description of processes are shown.

The results of the study can be used in the development of an adapted method for calculating schemes and regime parameters of systems (installations) for ensuring uninterrupted LNG gasification, taking into account the reliability and efficiency of evaporators.

Keywords: atmospheric evaporator, gasification plant, frost formation, liquefied natural gas, heat exchange, thermodynamic (exergetic) analysis, electric vaporizer.

## Введение

В настоящее время и, как ожидается, в ближайшей перспективе, основными потребителями природного газа (ПГ) в России будут [1,2]: электроэнергетика (39,5%), население (14,9%), нефтяная и химическая промышленность (11,2%), машиностроение (10,0%), коммунальное хозяйство (8,5%) и агропромышленный комплекс (7,5%).

Несмотря на то, что доля сжиженного природного газа (СПГ) в общем объеме поставок ПГ Российской Федерацией по данным Минэнерго России [3] в настоящее время составляет ~5% (29,5 млн. т), прогнозируется ее увеличение практически в 3 раза (до ~15% (110,0-125,0 млн. т)) к 2035 году [4].

Для газоснабжения населения, а также потребителей агропромышленного комплекса и коммунального хозяйства используются и разрабатываются малотоннажные СПГ-комплексы, включающие: модульные системы получения и хранения СПГ (до 500 т); модульные установки регазификации СПГ высокого (до 25,0 МПа), среднего (до 4,0 МПа) и низкого (до 1,6 МПа) давления, производительностью от 250 до 2 500 м$^3$/час.

В установках регазификации объектов малотоннажного потребления СПГ в качестве продукционных испарителей применяют воздушные испарители, как самый экономичный вариант по энергозатратам на регазификацию, однако, опыт эксплуатации газификационных установок (ГУ) с испарителями, использующими теплоту атмосферного воздуха в неблагоприятных условиях эксплуатации ($t_{окр.\ ср.} \cong 0^{o}$C; $\varphi$100%), показывает [5-6], что инееобразование на теплообменных поверхностях приводит к достаточно быстрому (8-16 часов) обмерзанию и последующему частичному или полному перекрытию межпанельного или межтрубного пространства испарителя (см. *рисунок 1*), что влечет за собой выход режимных параметров за допустимые пределы, снижение заданной производительности установки и, как следствие – останов испарителя на отогрев.

**Рис. 1.** Атмосферные испарители в осенне-зимний период эксплуатации

Существует несколько способов обеспечения бесперебойной регазификации СПГ, в том числе: инееподавление, механическое воздействие на целостность слоя криоосадка, а также различные виды резервирования испарителей. Приоритет отдается техническим решениям, не требующим мощных источников тепловой или электроэнергии, сложных механических устройств, дорогостоящих энергоносителей и т.д.

Ввиду актуальности обозначенной выше проблемы повышения надежности и эффективности малотоннажных СПГ-комплексов, необходимо провести анализ альтернативных способов и установок бесперебойной регазификации СПГ, включая:

- анализ методов повышения эффективности и надежности установок непрерывной регазификации (УНР) СПГ;
- сравнение данных по надежности и эффективности альтернативных вариантов УНР СПГ с испарителями различных типов.

## 1. Сравнительный термодинамический анализ установок газификации криогенных жидкостей с испарителями различных типов

При проведении общего термодинамического (эксергетического) анализа рассмотрены следующие варианты ГУ криогенных жидкостей с водяными электро- (ЭИ) и атмосферными (АИ) испарителями [5-7] (*рисунок 2*):

- с термомеханическим насосом;
- с термомеханическим насосом и АИ высокого давления (ВД);
- с компрессором и ЭИ;
- с плунжерным насосом и ЭИ;

- с плунжерным насосом, АИ ВД и догревателем;
- холодный газификатор с ЭИ.

Исходя из результатов анализа данных, представленных на *рисунке 2*, следует, что ГУ с водяными ЭИ имеют самую низкую энергоэффективность, т.о., в ГУ рекомендуется применять воздушные (атмосферные) испарители криопродуктов во всем диапазоне рабочих давлений (от 2,0 до 40,0 МПа).

Кроме того, в [10] показано, что ГУ с крионасосами и атмосферными испарителями затрачивает на газификацию ~ в 3 раза меньше электроэнергии, чем установки с водяными электроиспарителями, и, соответственно, выше их термодинамический (эксергетический) КПД.

### 2. Анализ возможностей повышения эффективности атмосферных испарителей СПГ панельного типа за счет снижения массогабаритных характеристик

Снижение массогабаритных характеристик АИ, как одного из направлений повышения их эффективности, осуществляется двумя основными путями.

*Увеличение компактности поверхности теплообмена* – данный способ заключается в рациональной компоновке необходимой теплообменной поверхности, при которой обеспечивается снижение объема аппарата, массы его несущих металлоконструкций, занимаемой площади при обязательном выполнении требования устойчивой (по производительности) работы испарителя в течение заданного времени.

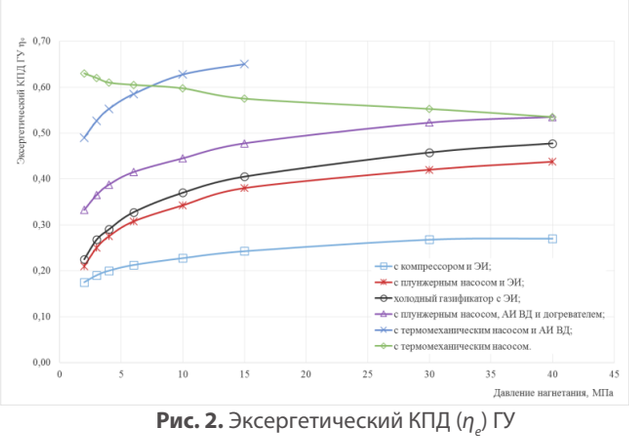



**Рис. 2.** Эксергетический КПД ($\eta_e$) ГУ

*Интенсификация наружного теплообмена* – этот способ связан с увеличением производительности (при заданной поверхности).

Способы могут быть использованы как отдельно, так и в комбинации.

В настоящее время, в качестве рабочих, рассматриваются две основные возможности увеличения компактности АИ панельного типа:

- уменьшение расстояния между панелями;
- увеличение размеров панелей.

Следует отметить, что увеличение компактности испарителя возможно до определенной величины, после которой компактность вступает в противоречие с производительностью испарителя. Иными словами, повышение компактности может привести к частичной или полной забивке инеем и льдом воды межпанельного пространства при длительной эксплуатации испарителя.

Технические решения, увеличивающие время зарастания межпанельного пространства, представлены на *рисунке 3*.

Здесь верхние концы панелей размещены на различной высоте в пределах высотных отметок в чередующейся последовательности. Инеобразование наиболее интенсивно в верхних сечениях каждой панели, где влагосодержание воздуха наибольшее. Если в обычной конструкции оно приводит к перекрытию межпанельных каналов и, как следствие, падению производительности, то в предлагаемой конструкции влияет на производительность в значительно меньшей степе-

**Рис. 3.** Схема размещения панелей испарителя [11]:
панели одинаковой высоты; разновысокие панели

ни. Это позволяет увеличить период рабочей кампании.

Подобный принцип реализован в круглом испарителе (*рисунок 4*), где панели установлены на разном расстоянии от центра в пределах двух концентрических окружностей в чередующейся последовательности.

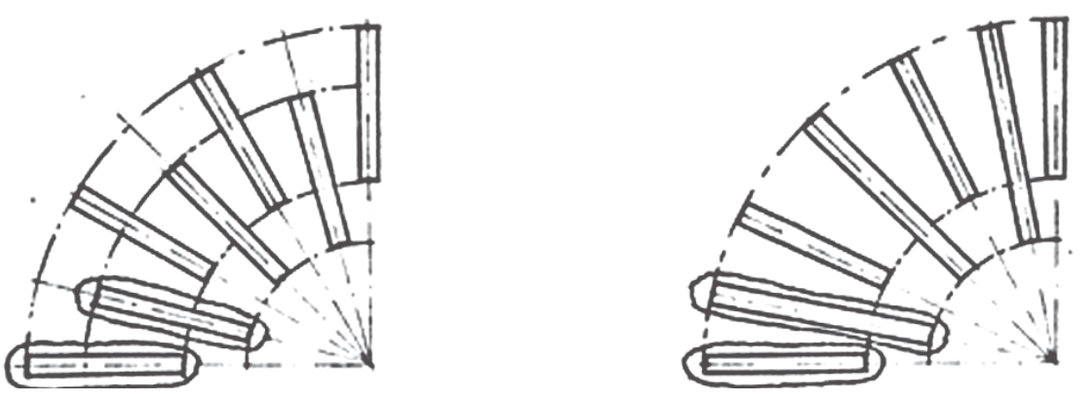
Перспективной, с точки зрения увеличения времени забивки межпанельного пространства, является идея компоновки испарителя таким образом, чтобы панели, имеющие температуру стенки, близкую к температуре кипения криогенной жидкости, попеременно чередовались с панелями, имеющими температуру стенки, близкую к температуре затвердевания воды (панели теплой секции). В этом случае расположение теплой панели между двумя холодными (*рисунок 5*) обеспечивает интенсивный отвод большей части водяного пара из воздуха за счет бародиффузии от теплой панели к холодной, в пограничном слое которой водяной пар быстро замерзает и в виде тумана или инея в потоке выносится за пределы теплообменного блока.

**3. Анализ возможностей повышения эффективности атмосферных испарителей за счет интенсификации наружного теплообмена**

Интенсификация наружного теплообмена может быть осуществлена различными способами (использование вынужденного движения газа, вибрация поверхности, пульсирующий поток газа, организация движения псевдоожиженных частиц и т.д.).

На практике в атмосферных испарителях применяют традиционный способ интенсификации – замену свободной конвекции на вынужденную с помощью установки дополнительного обдува [14]. При этом эффект от увеличения скорости воздуха может быть весьма значительным (*рисунок 6*).

Также представляет интерес конструкция испарителя с самообдувом [15] (*рисунок 7*), в котором часть энергии испарившегося газа расходуется на вращательное движение ведущей крыльчатки (пневмопривода), расположенной на выходном патрубке. Ведущая крыльчатка жестко связана с ведомой крыльчаткой вентиля-



а) б)

**Рис. 4.** Схема размещения панелей испарителя [12]:
а) панели одинаковой ширины; б) разноширокие панели

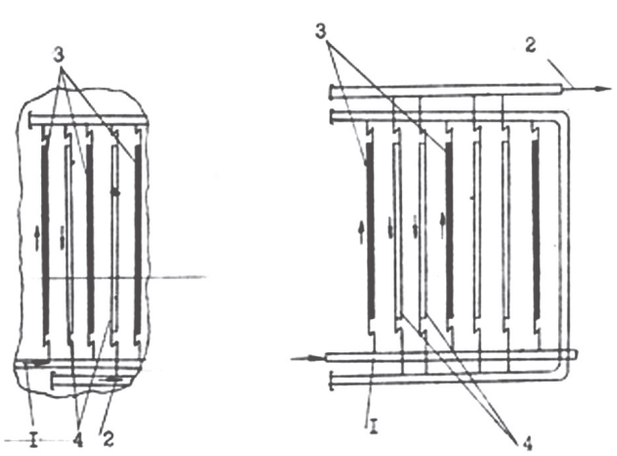



**Рис. 5.** Схема размещения панелей испарителя [13]:
1 – вход жидкости, 2 – выход газа, 3 – «холодные» панели, 4 – «теплые» панели

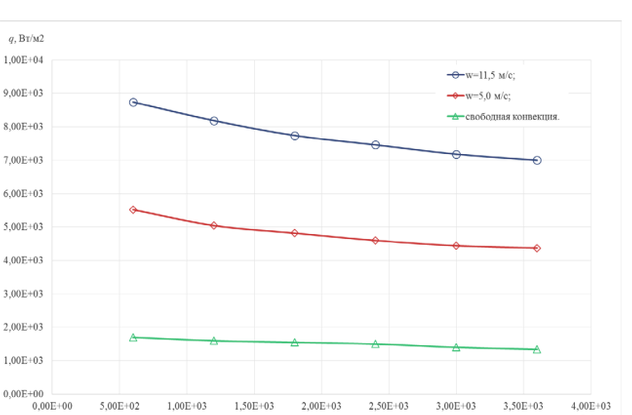



**Рис. 6.** Влияние скорости движения воздуха на плотность теплового потока при конвекции вдоль вертикальной цилиндрической поверхности

тора, которая приводит в движение воздух, находящийся в межпанельном пространстве.

Другие, названные выше, способы интенсификации конвективного теплообмена, по-видимому, тоже могут быть применены в воздушных испарителях. Однако для этого необходимо преодолеть трудности, связанные с использованием внешнего источника энергии, с обеспечением высокой надежности и технологичности конструкции.

Увеличение интенсивности теплообмена приведет к увеличению интенсивности массообмена, а, следовательно, скорости роста инея и льда воды на панелях. Таким образом, эксплуатация высокофорсированного испарителя в течение длительного времени затруднена. Увеличение ресурса его безостановочной работы возможно различными способами. Мероприятия, описанные выше, позволят несколько увеличить продолжительность рабочей кампании испарителя с вынужденной конвекцией воздуха в межпанельном пространстве.

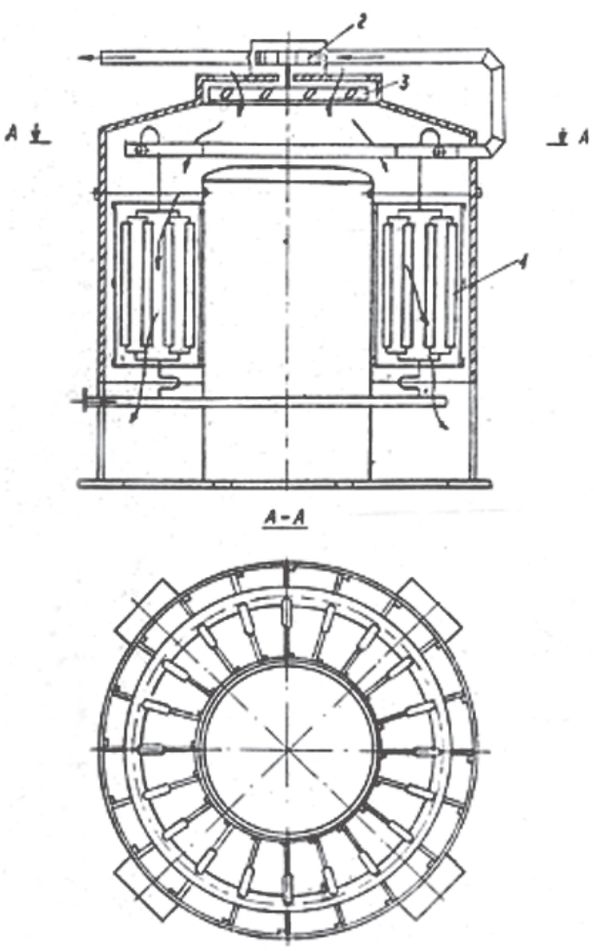



**Рис. 7.** Испаритель криогенного газификатора с самообдувом панелей [15]:
1 – панели, 2 – пневмопривод, 3 – вентилятор

**4. Особенности работы атмосферных испарителей при математическом описании процессов. Тепломассообмен в условиях образования инея**

Особенностью работы АИ является то, что температура поверхности теплообмена изменяется в очень широком диапазоне: $T = \{T_{кип.}=112\ К \ldots T_{окр.\ ср.}\}$, вследствие чего на большей части поверхности теплообмена реализуются процессы инее- и льдообразования. Процесс теплоотдачи от влажного воздуха к поверхности, имеющей температуру $T<273$ К, в общем случае следует рассматривать как сопряженную задачу, включающую в себя процесс тепло- и массообмена между потоком воздуха и поверхностью раздела фаз (поверхностью инея), с одной стороны, и процесс теплопроводности через слой инея (льда) – с другой. Для количественного описания этого сложного процесса требуется привлечение математического аппарата различных разделов теории тепло- и массообмена. Инженерный подход к решению данной проблемы заключается в оценке влияния составляющих процесса тепло- и массообмена на суммарный перенос теплоты и их количественный анализ.

**Выводы**

1. В газификационных установках во всем диапазоне рабочих давлений (от 2,0 до 40,0 МПа) рекомендуется применять воздушные (атмосферные) испарители криопродуктов вследствие того, что ГУ с водяными электроиспарителями имеют самую низкую энергоэффективность.

2. Повышение эффективности воздушных (атмосферных) испарителей криопродуктов возможно за счет снижения массогабаритных характеристик при неизменной производительности, что достигается двумя путями: увеличением компактности поверхности теплообмена либо интенсификацией наружного теплообмена.

3. Повышение эффективности АИ за счет интенсификации наружного теплообмена приведет к увеличению интенсивности массообмена, а, следовательно, скорости роста инея и льда воды на панелях. Т.о. применение данного способа возможно либо в течение непродолжительного времени, либо при использовании вынужденной конвекцией воздуха в межпанельном пространстве.

**Литература**

1. Рынок природного газа России: проблемы и перспективы развития // Офиц. сайт Минэнерго России, 2016. URL: https://minenergo.gov.ru/system/download-pdf/6164/65814 (дата обращения: 01.03.2022).

2. Перспективы развития газового рынка России // Офиц. сайт Фонда «Центр стратегических разработок», 2019. URL: https://www.csr.ru/upload/ iblock/c2c/ c2cdd347bac68a0b244cd4efc57c0402.pdf (дата обращения: 01.03.2022).
3. Производство и поставки сжиженного природного газа (СПГ) // Офиц. сайт Минэнерго России, 2022. URL: https://minenergo.gov.ru/node/4853 (дата обращения: 01.03.2022).
4. Выгодное сжижение // rg.ru: ежедн. интернет-изд. «Российская газета» – Федеральный выпуск № 1 (8055) 08.01.2020 (дата обращения: 01.03.2022).
5. Ельчинов В.П. Отечественные атмосферные испарители криогенных жидкостей // сайт: «Аппараты Ельчинова», 2022. URL: http://aparatel.ru/isparitel.pdf (дата обращения: 01.03.2022).
6. Ануров С.А. Криогенные технологии разделения газов. М., 2017. 233 с.
7. Атмосферные испарители // сайт ООО «НПО Мониторинг», 2022. URL: http://www.monitoring-npo.ru/oborudovanie/atmosfernye-ispariteli (дата обращения: 01.03.2022).
8. Атмосферные испарители для сжиженного природного газа и продуктов разделения воздуха // сайт ООО «Мониторинг Вентиль и Фитинг», 2022. URL: https://mvif.ru/atmosfernye-ispariteli/ (дата обращения: 01.03.2022).
9. Промышленные электрические нагреватели и испарители во взрывозащищенном и в общепромышленном исполнении для жидкостей и газов // сайт ООО «Мониторинг Вентиль и Фитинг», 2022. URL: https://mvif.ru/nagrevateli-gazovyie/ (дата обращения: 01.03.2022).
10. Способ холодной регазификации криогенной жидкости бесперебойного действия и устройство для его осуществления: пат. 2615302 (Россия). № 2015142804; заявл. 08.10.2015; опубл. 04.04.2017. Бюл. № 10.
11. Испаритель-газификатор: а.с. 88569 (СССР). № 2942378/23-06; заявл. 19.06.1980; опубл. 1981. Бюл. № 44.
12. Криогенный испаритель: а.с. 1520298 (СССР). № 4337226/23-26; заявл. 01.12.1987; опубл. 1989. Бюл. № 41.
13. Атмосферный газификатор жидких криопродуктов: а.с. 1615498 (СССР). № 88 4450953; заявл. 04.07.1988; опубл. 1990. Бюл. № 47.
14. Усовершенствованный испаритель жидких газов (Jmprovements in Vaporizers for Liquified Gazes): пат. 753285 (Англия); заявл. 24.07.1953; опубл. 18.07.1956.
15. Устройство для самообдува испарителя криогенного газификатора: а.с. 1732755 (СССР). № 4840783/06; заявл. 21.06.1990; опубл. 1993. Бюл. № 45-46.

543.21.543.062

# ПРИМЕНЕНИЕ ПЬЕЗОКВАРЦЕВЫХ МИКРОВЕСОВ ДЛЯ ЭКСПРЕССНОГО ВНЕЛАБОРАТОРНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАКТИЧЕСКИХ СМОЛ В ДИЗЕЛЬНЫХ ТОПЛИВАХ*

# APPLICATION OF PIEZO QUARTZ MICROWEIGHTS FOR EXPRESS OUT-OF-LABORATORY DETERMINATION ACTUAL RESINS IN DIESEL FUELS

Дарья Александровна Порядина
*кандидат химических наук*
преподаватель кафедры
«Материаловедения и ремонта вооружения»
филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел.: +7 (977) 261-83-65
E-mail: sibilda1@yandex.ru

Татьяна Анатольевна Кучменко
*доктор химических наук, профессор*
заведующая кафедрой
«Физической и аналитической химии»
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
университет инженерных технологий» (ВГУИТ)
Адрес: 394036, г. Воронеж, проспект Революции, д. 19
Тел.: +7 (920) 422-77-25
E-mail: tak1907@yandex.ru

Иван Сергеевич Бузакин
курсант 3 курса факультета №1
«Стартовых и технических комплексов»
филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)
Тел.: +7 (977) 261-83-65
E-mail: sibilda1@yandex.ru

Ирина Александровна Грибоедова
студентка 5 курса
кафедра «Физической и аналитической химии»
ФГБОУ ВО ВГУИТ
Тел.: +7 (930) 407-97-16
E-mail: i.griboedowa@yandex.ru

Пётр Алексеевич Карлов
студент 5 курса
кафедра «Физической и аналитической химии»
ФГБОУ ВО ВГУИТ
Тел.: +7 (930) 407-97-16
E-mail: petrkarloff@yandex.ru

**Аннотация**
В статье показана возможность применения метода пьезокварцевого микровзвешивания и модели портативного прибора на основе высокочувствительных пьезовесов для экспрессной оценки концентрации фактических смол в дизельных топливах, представлены результаты исследования дизельного топлива по стандартным методикам.
**Ключевые слова:** качество, дизельное топливо, фактические смолы, экспрессный способ, пьезокварцевое микровзвешивание, пьезовесы, портативное устройство.

**Summary**
The article shows the possibility of using the piezo-quartz microweighting method and a portable device model based on highly sensitive piezoweights for express assessment of the concentration of actual resins in diesel fuels, presents the results of a study of diesel fuel by standard methods.
**Keywords:** quality, diesel fuel, concentration of actual resins, express method, piezo quartz microweighting, piezo weights, portable device.

## Введение

Создание перспективных видов вооружения, военной и специальной техники и обеспечение безаварийной работы является приоритетным направлением развития науки, технологий и техники РФ. Применение топлив ненадлежащего качества приведет к возникновению неполадок техники.

Для определения склонности дизельных топлив к образованию низкотемпературных отложений контролируют показатель «содержание фактических смол» (мг/100 см$^3$). При величине содержания фактических смол более 40 мг/100 см$^3$ применение дизельного топлива приведет к засорению сопла форсунок, ухудшению распыления или полному прекращению подачи топлива. Данный показатель является обязательным при выполнении полного и арбитражного анализа топлив [1,2].

По требованиям ГОСТ 305-82 содержание фактических смол в дизельном топливе различных марок определяется методом Бударова [1-3].

Данный метод заключается в выпаривании образца испытуемого топлива под струёй водяного пара в условиях испытания на специальной установке [3].

* Результаты получены при выполнении НИР в рамках гранта по программе «У.М.Н.И.К.» №11438ГУ/2017.

Стандартная методика непригодна для выполнения приемо-сдаточного и контрольного анализа из-за применения сложного и дорогостоящего аппаратурного оформления.

Другим способом определения фактических смол в топливах является метод фракционной перегонки, заключающийся в нагревании пробы дизельного топлива до температуры кипения и последующего испарения жидкой фазы, отгонки и охлаждении летучей фракции фракций и измерении массы неиспаряемого остатка после перегонки [4]. Время анализа составляет не менее 2 часов, сложность аппаратурного оформления делает практически невозможным применение во внелабораторных условиях, в том числе в режиме «на месте».

Известно применение высокочувствительных пьезокварцевых резонаторов, кварцевая пластина которых совершает колебания с высокой частотой, генерирует объемные акустические волны для анализа газовых и жидких сред с чувствительностью до $10^{-11}$ г.

Уравнение модели Зауэрбрея отражает математическую зависимость преобразования изменения массы на поверхности электрода кварцевого резонатора в приращение выходной частоты колебания [5]:

$$\Delta F = - k \cdot \Delta m,$$

где $\Delta F$ – изменение частоты колебания кварцевой пластины до и после нагрузки, Гц;
$\Delta m$ – изменение массы исследуемого вещества на электродах резонатора, мкг;
$k$ – константа, которая зависит от характеристик кварцевой пластины, электродов, условий микровзвешивания.

Применение малого объема пробы – до 5 мкл, низкое время получения отклика, низкая коррозионная активность электродов, малые размеры пьезорезонаторов и схем их возбуждения позволяют разработать устройство с элементами Пельтье для испарения и последующего охлаждения исследуемого образца и определения массы неиспаряемого остатка.

Цель исследования – разработать способ экспрессного измерения содержания фактических смол в дизельном топливе с применением пьезовесов в лабораторных и внелабораторных условиях, значительно снижающий время и себестоимость анализа по сравнению с существующими решениями.

**Материал и методы исследования**

В качестве объектов исследования выбраны 8 образцов продукта «Топливо дизельное» марки Л-0,2-62 ГОСТ 305-82 «Топливо дизельное. Технические условия» разных производителей и дат розлива, предоставленных в автопарке ФВА РВСН им. Петра Великого (*таблица 1*).

Для всех проб измерены стандартные показатели: цетановое число; плотность при 20°С; кинематическая вязкость при 20°С; температура перегонки 50 и 96% топлива; содержание фактических смол, мг на 100 см$^3$ топлива; кислотность, мг КОН на 100 мл топлива; содержание водорастворимых кислот и щелочей; температура вспышки в закрытом тигле, °С; температура помутнения, °С; температура застывания, °С; содержание механических примесей и воды; испытание на медной пластине на соответствие требованиям ГОСТ 305-82.

В качестве измерительных элементов чувствительных микровесов применяли пьезорезонаторы ОАВ-типа с серебряными электродами диаметром 5 мм и базовой частотой колебаний 10,0 МГц (*рисунок 1*).

Для измерения частоты колебания измерительных элементов применяли статический одноканальный анализатор газов «САГО» (ООО «Сенсорика-Новые Технологии», Россия) с персональным ПО для фиксирования частоты колебаний резонатора с шагом 1 Гц/с. Измеряли частоту колебания пьезорезонатора до нагрузки, после модификации пробой и после испарения летучей фракции в течение 5-10 с.

**Таблица 1**

Характеристика объектов исследования

| Наименование | Наименование продукта | Марка | Изготовитель |
|---|---|---|---|
| Образец 1 | Топливо дизельное | Л-0,2-62 | Омский НПЗ |
| Образец 2 | | | Рязанский НПЗ |
| Образец 3 | | | Омский НПЗ* |
| Образец 4 | | | Омский НПЗ* |
| Образец 5 | | | Волгоград-нефтепереработка |
| Образец 6 | | | Омский НПЗ* |
| Образец 7 | | | Орскнефтеорг-синтез |
| Образец 8 | | | Омский НПЗ* |

* Образцы предоставлены одинаковым производителем, дата отбора проб различная

Подготовка проб дизельного топлива заключалась в отборе средней пробы образца и при необходимости в микрофильтровании. Фиксировали исходную частоту колебаний резонатора $F_0$ (МГц), на электрод микрошприцем наносили анализируемую пробу дизельного топлива (иного топлива) объемом 1-5 мкл, высушивали каплю пробы в сушильном шкафу в течение 10 мин при температуре 95±2°С.

Охлаждали резонатор в эксикаторе и устанавливали в частотомер. Измеряли повторно частоту колебаний резонатора после сушки с нелетучим остатком на электроде $F_c$ (МГц). Рассчитывали изменение частоты колебаний кварцевой пластины до нанесения пробы и после высушивания $\Delta F$ (МГц):

$$\Delta F = (F_0 - F_c) \cdot 10^6,$$

где $F_0$ – исходная частота колебаний резонатора, Гц;

$F_c$ – частота колебаний после высушивания нанесенной капли пробы, Гц.

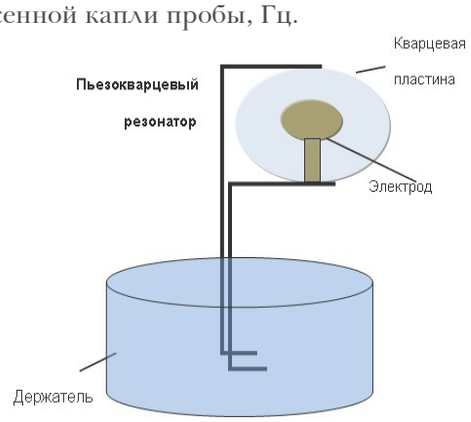



**Рис. 1.** Схема пьезорезонатора

Содержание фактических смол в дизельном топливе $m_{пьезо}$ (мкг) рассчитывали по уравнению Зауэрбрея [5]:

$$m_{пьезо} = \frac{\Delta F \cdot S}{2.27 \cdot F_0^2},$$

где $S$ – площадь электродов резонатора, см$^2$.

Для регенерации резонатора электрод обрабатывали спиртом или толуолом и просушивали [6].

Правильность результатов пьезокварцевого микровзвешивания оценивали по результатам фракционной перегонки дизельного топлива.

**Полученные результаты и их обсуждение**

Предварительно определяли стандартные показатели качества для проб дизельного топлива Л-0,2-62, связанные с содержанием компонентов нефтяных фракций и других нелетучих соединений (*таблица 2*).

Установлено, что образцы №1, №3-7 соответствуют требованиям по всем контролируемым показателям.

В образцах №2 и №8 цетановое число ниже регламентированного значения, они характеризуются недостаточным самовоспламенением, из-за присутствия бензиновой фракции.

В образце №8 цетановое число ниже заявленного, кинематическая вязкость и температура вспышки занижены среди выборки, кислотность и содержание фактических смол несколько выше средней по выборке. Этот образец можно охарактеризовать, как образец длительного хранения, его рекомендуется расходовать в первую очередь, так как в нем возможно образование низкотемпературных отложений. Образец №2 характеризуется цетановым числом ниже нормативного значения согласно ГОСТу,

**Таблица 2**

Результаты анализа образцов дизельного топлива на соответствие требованиям ГОСТ 305-82

| № п/п | Наименование показателей | Требование ГОСТ 305-82 | Номера проб (согласно *таблице 1*) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | Цетановое число | Не менее 45 | 48 | 41,9 | 50,1 | 48 | 50,1 | 47 | 50 | 41,2 |
| 2 | Плотность при 20°С, г/см$^3$ | Не более 0,860 | 0,843 | 0,837 | 0,846 | 0,843 | 0,845 | 0,848 | 0,863 | 0,827 |
| 3 | Фракционный состав | | | | | | | | | |
| | Тп 50%, °С | Не выше 280 | 279 | 258 | 274 | 279 | 273 | 278 | 275 | 262 |
| | Тп 96%, °С | Не выше 360 | 359 | 355 | 345 | 359 | 353 | 350 | 358 | 368 |
| 4 | Вязкость кинематическая при 20°С | 3,0-6,0 | 4,90 | 4,46 | 4,77 | 5,0 | 4,69 | 5,02 | 4,94 | 3,65 |
| 5 | Содержание фактических смол, мг на 100 см$^3$ топлива | Не более 40 | 10,2 | 11,0 | 4,5 | 10,0 | 7 | 14,0 | 8 | 13 |
| 6 | Кислотность, мг КОН на 100 мл топлива | Не более 5 | 0,46 | 0,89 | 2,65 | 0,51 | 1,28 | 1,3 | 0,09 | 2,49 |
| 7 | Температура вспышки в закрытом тигле, °С | Не ниже 40 | 79 | 72 | 65 | 79 | 65 | 72 | 69 | 63 |
| 8 | Температура помутнения, °С | Не выше -5 | -7 | -5 | -9 | -5 | -5 | -9 | -7 | -8 |
| 9 | Температура застывания, °С | Не выше -10 | -15 | -10 | -15 | -12 | -15 | -17 | -16 | -15 |
| 10 | Испытание на медной пластинке | Выдерживает | Выдерживает | | | | | | | |
| 11 | Содержание водорастворимых кислот и щелочей | Отсутствие | Отсутствие | | | | | | | |
| 12 | Содержание механических примесей и воды | Отсутствие | Отсутствие | | | | | | | |

а температура перегонки на 50% ниже средней по выборке. Предположительно в образец добавлена керосиновая фракция. Данное топливо рекомендуется эксплуатировать при более низких температурах. Для образца №3 характерно минимальное содержание фактических смол среди других проб из рассматриваемой выборки, кислотность пробы завышена. Этот образец является топливом длительного хранения.

Провели определение массы нелетучего осадка в образцах дизельного топлива с применением анализатора газов на пьезосенсорах. Для проверки правильности предлагаемого подхода, оценена корреляция результатов нового метода и полученных методом фракционной перегонки (*рисунок 2*).

Установлено, что коэффициент достоверности аппроксимации для данной зависимости составляет $R^2=0,97$. Таким образом, пробы, характеризующиеся наименьшей массой сухого остатка по методу пьезокварцевого микровзвешивания, имеют низкие значения стандартного показателя – «содержание фактических смол». Высокий параметр корреляции позволяет рекомендовать пьезокварцевые резонаторы для разработки портативного устройства для оценки качества топлив, на примере дизельного топлива марки ДТ Л-0,2-62 в режиме «на месте», которое будет представлено в следующей статье.

**Выводы**

Положительно оценена возможность применения метода пьезокварцевого микровзвешивания для разработки экспрессного способа оценки нелетучего остатка дизельных топлив. Показана возможность быстрой оценки свойств топлива по стандартным показателям, которые соответствуют требованиям стандарта, но отражают особенности их состава.

**Литература**

1. Сафонов Л.С., Ушаков А.И. Автомобильные топлива: Химмотология. Эксплуатационные свойства. СПб.: НПИКЦ, 2002. 264 с.
2. ГОСТ 305-82 Топливо дизельное. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2003. 14 с.
3. ГОСТ 8489-85 Топливо моторное. Метод определения фактических смол (по Бударову). М.: Стандартинформ, 1985. 14 с.
4. ГОСТ 2177-99. Нефтепродукты. Методы определения фракционного состава. М.: Стандартинформ, 2001. 20 с.
5. Кучменко Т.А. Химические сенсоры на основе пьезокварцевых микровесов // Проблемы аналитической химии, 2011. Т.14. С.127-203.
6. Патент на изобретение RU 2680163 C1. Способ определения содержания нелетучих соединений в неводных средах / Кучменко Т.А., Грибоедова И.А., Порядина Д.А., 18.02.2019. Заявка № 2017141339 от 27.11.20 17.

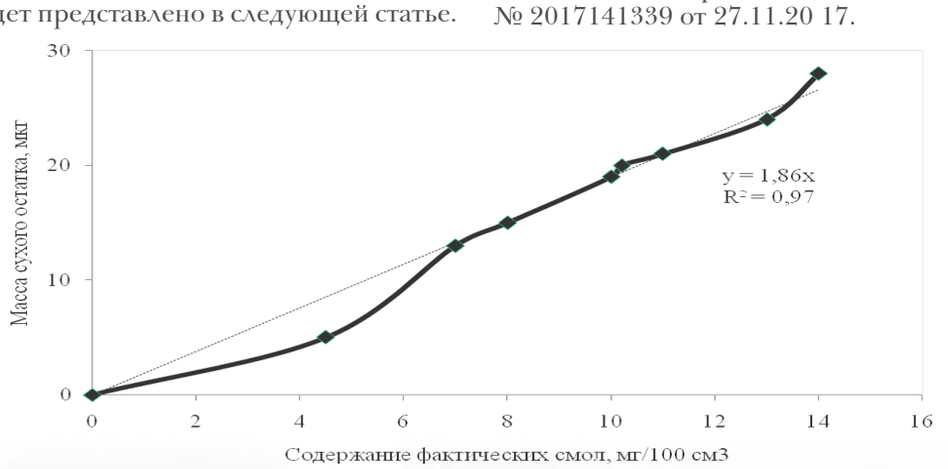
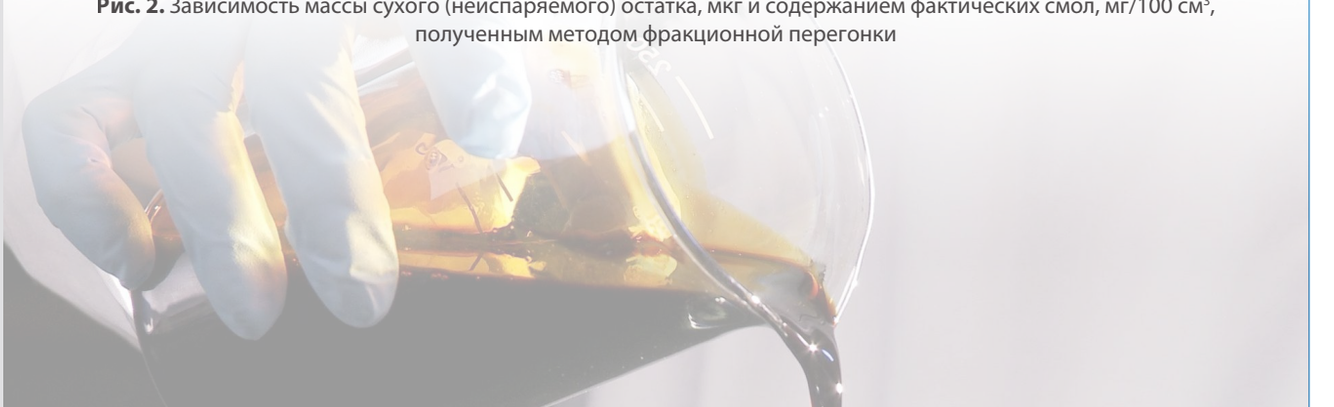



**Рис. 2.** Зависимость массы сухого (неиспаряемого) остатка, мкг и содержанием фактических смол, мг/100 см$^3$, полученным методом фракционной перегонки



УДК 656.052.16

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ КАРТЫ ДОРОГ ДЛЯ НАЧАЛЬНОЙ ВЫСТАВКИ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ НАЗЕМНОЙ НАВИГАЦИИ

# USING A DIGITAL ROAD MAP FOR INITIAL EXHIBITION OF AUTONOMOUS TERRESTRIAL NAVIGATION SYSTEMS

Максим Андреевич Коршунов
адъюнкт
филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17

Алексей Викторович Шолохов
*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 (924) 607-47-88
E-mail: monibwen@gmail.com

**Аннотация**

Рассматривается задача начальной выставки автономной системы наземной навигации по цифровой карте дорог. Начальная выставка осуществляется на основе сопоставления приборной траектории, измеренной на борту объекта, и совокупности возможных траекторий, записанных в цифровую карту дорог. Для решения поставленной задачи используется алгоритм динамической трансформации временной шкалы. Представлены результаты моделирования начальной выставки системы наземной навигации.

**Ключевые слова:** начальная выставка, система наземной навигации, цифровая карта дорог, динамическая трансформация временной шкалы.

**Summary**

The problem of initial alignment of the dead-reckoning terrain navigation system aided by the digital road map is considered. The solution of the problem is based on the matching of digital road map data and dead-reckoning navigation parameters. They are produced by the navigation system during a short time of movement of the terrain object from the starting point. To solve this problem, the algorithm of dynamic time warping is used. Simulation results for the initial alignment of the terrain navigation system aided by digital road map are presented.

**Keywords:** initial exhibition, ground navigation system, digital road map, dynamic transformation of the time scale.

## Введение

Для многих наземных объектов важно обеспечить автономность решения задачи навигации. При этом допустимо использование только информации, доступной на борту объекта. Как правило, такие системы наземной навигации (СНН) строятся по принципу счисления пути [1] согласно которому, необходима начальная выставка СНН, включающая определение начальных координат и параметров ориентации наземного объекта с заданной точностью. Аналогичные операции выполняются и в процессе нормального функционирования СНН для обеспечения требуемой точности, а также в случае сбоя. В настоящее время операции по начальной выставке автономных СНН проводят на заблаговременно подготовленных контрольных точках, которые выбираются на предполагаемых маршрутах движения наземного объекта – автомобильных дорогах.

Такой подход к начальной выставке СНН существенно ухудшает мобильность вследствие ограничений на удаленность объекта от контрольных точек и требует заблаговременной и весьма трудоемкой подготовки контрольных точек на возможных маршрутах. Также определение начальной ориентации СНН сопряжено с дополнительными затратами времени на получение объема измерительных данных, обеспечивающего высокую точность угловых параметров. Кроме этого, финальная точность параметров СНН во время последующего движения объекта обеспечивается и высокой квалификацией оператора, поскольку его ошибка не может быть обнаружена в системе счисления до установки объекта на последующей контрольной точке. Все это приводит к необходимости поиска путей решения задачи начальной выставки автономных СНН.

Одно из направлений решения указанной задачи может быть основано на использовании информации цифровой карты дорог (ЦКД) [2,3]. Записанные в ЦКД участки небольшой протяженности (несколько километров) часто обладают уникальной геометрической формой. Причем, чем больше протяженность участка, тем «более уникальна» его геометрическая форма, т.е. меньше вероятность найти похожую комбинацию участков из записанных в ЦКД. Это в принципе позволяет идентифицировать участок, по которому двигался объект, из их совокупности, представленной в ЦКД. Решение этой задачи равноценно начальной выставке СНН и обеспечивает получение финальных навигационных параметров (текущих координат и ориентации объекта).

Ближайшими аналогами задачи начальной выставки СНН по данным ЦКД могут считаться задачи корреляционно-экстремальной навигации [4,5], решаемые с помощью поисковых алгоритмов. Однако использование известных поисковых алгоритмов здесь практически невозможно ввиду очень большого количества элементов ЦКД – прямолинейных отрезков, что не позволяет получать результат за разумное время. В связи с этим необходим поиск новых, менее затратных с вычислительной точки зрения, решений задачи идентификации элементов ЦКД по информации от СНН. В статье рассматривается вариант такого решения с направленным перебором отрезков ЦКД, использующий алгоритм динамической трансформации временной шкалы (ДТВШ) [6,7]. Обоснованы признаки для сопоставления, мера близости приборной траектории СНН и отрезков ЦКД. Приводятся результаты имитационного моделирования начальной выставки СНН по данным ЦКД.

### Анализ путей решения задачи начальной выставки СНН по ЦКД

Известно, что решение любой задачи в значительной степени определяется ее формализованной постановкой. Постановка задачи, как правило, формулируется в рамках известных методов, либо в сравнении с каким-либо известным методом. Так, большинство задач комплексной обработки навигационной информации в настоящее время решаются на основе оптимальных фильтров калмановского типа [8]. Отличительной особенностью задачи определения начальных координат и ориентации в СНН путем сопоставления с ЦКД является то, что «наилучший» метод ее решения в настоящее время не найден. В связи с этим целесообразен анализ возможностей использования существующих подходов к решению аналогичных задач из смежных областей.

Наиболее простым на первый взгляд представляется решение задачи начальной выставки СНН по ЦКД на основе полного перебора вариантов начального положения объекта и его ориентации. Сопоставление каждого такого варианта с ЦКД в принципе позволяет найти решение задачи. Однако, во-первых, само по себе сопоставление отнюдь не является простой операцией [9]. Во-вторых, число вариантов при этом определяется дискретностью искомых параметров и размерами области поиска. При допустимых погрешностях начальных координат 10 м и ориентации 1°, размерах области поиска несколько сотен километров по каждой координатной оси число вариантов настолько велико, что решение практически невозможно найти даже на современных ЭВМ. Поэтому далее рассматриваются методы, включающие в себя элементы «направленного» перебора.

Известно решение задачи начальной выставки СНН по ЦКД, полученное на основе метода бивалентного квадратичного программирования [5]. В нем используются бивалентные (0 или 1) переменные для определения факта принадлежности отрезка ЦКД приборной траектории, выработанной СНН на непродолжительном начальном этапе движения объекта по записанной в ЦКД траектории. Параметры минимизируемого функционала рассчитываются на основе сопоставления каждого отрезка ЦКД с приборной траекторией. Система ограничений формируется так, чтобы выбранные отрезки ЦКД образовывали цепочку без разрывов и ветвлений, при этом ее протяженность не превышает длины приборной траектории. Это решение быстрее полного перебора, но имитационное моделирование показало, что и оно ограничено в практическом применении областью поиска радиусом до 10 км. Эту оценку можно отнести и к другим возможным решениям задачи начальной выставки СНН по ЦКД, которые могут быть получены на основе известных методов программирования [10], а также вычислительных методов нахождения решений таких задач.

К числу методов решения аналогичных задач, получивших большое развитие в последнее время, относятся алгоритмы сопоставления изображений в компьютерном зрении. Они сегодня позволяют получать решения в режиме реального времени или за минимальное время. Особенностью сравнения изображений в данной области является использование особых точек, которые находятся с помощью различных так называемых детекторов. Были проанализирова-

ны следующие наиболее используемые подходы: SIFT (от англ. Scale-invariant feature transform) – масштабно-инвариантная трансформация признаков с применением различных детекторов (Shi-Tomasi, Харриса) [11,12]; SURF (от англ. Speeded Up Robust Features) – Устойчивые ускоренные признаки [13]; BRISK (от англ. Binary Robust Invariant Scalable Keypoints) – Бинарные надежные инвариантные масштабируемы ключевые точки [14]; FAST (от англ. Features from Accelerated Segment Test) – Функции ускоренного тестирования сегментов [15].

Среди них не удалось однозначно отдать предпочтение единственному: каждый обладает своими достоинствами и недостатками и может быть наиболее предпочтительным для решения какой-либо задачи. Например, FAST обладает несравнимой скоростью обработки изображений, однако уступает остальным методам в качестве детектирования и показывает гораздо худший результат по точности сопоставления. Анализ рассмотренных методов на данный момент показал, что общим недостатком применения рассмотренных детекторов компьютерного зрения является правильное выделения особых точек на изображении приборной траектории и соответствующего ей участка на ЦКД, так как они могут различаться, что не позволяет правильно производить сопоставление. Поэтому далее для уменьшения времени получения решения задачи используется DTW-алгоритм (от англ. Dynamic Time Warping) – алгоритм динамической трансформации временной шкалы [6,7]. Ниже приведена постановка в рамках этого метода.

### Постановка задачи

Пусть ЦКД задана в векторном формате на координатной плоскости множеством $N$ прямолинейных отрезков, соответствующих реальному положению осевых линий автомобильных дорог [16]. Каждый $i$-й отрезок, $i=1\ldots N$, задается уникальным номером $K_i$, координатами $(X_i^{\text{н}}, Y_i^{\text{н}})$ начальной и конечной $(X_i^{\text{к}}, Y_i^{\text{к}})$ точек в плоской прямоугольной системе координат. Взаимно независимые погрешности координат всех точек характеризуются дисперсией $D_k$.

Наземный объект движется по маршруту, представленному в ЦКД прямолинейными отрезками. На непродолжительном (до $m$-го такта) начальном этапе движения СНН вырабатывает координаты $(X_j^p, Y_j^p)$ и дирекционный угол $\alpha_j^p$, $j=1\ldots m$, составляющие приборную траекторию. Они получены при нулевых значениях начальных координат и ориентации. Дисперсии погрешностей координат $D_p$ (большое число) и дирекционного угла $D_\alpha$ характеризуют область неопределенности начальных координат объекта и его ориентации.

Задача состоит в том, чтобы обосновать выбор и математически описать признаки для сопоставления указанных выше данных СНН и ЦКД, с их использованием определить меру близости приборной траектории СНН и отрезков ЦКД и, окончательно, идентифицировать номера $K_n^*$ отрезков ЦКД, соответствующих приборному маршруту, путем минимизации меры близости.

Таким образом, была представлена формальная постановка задачи, а наглядный вид постановки задачи представлен на *рисунке 1*.

### Основные этапы алгоритма начальной выставки СНН по данным ЦКД

При выборе признаков для сопоставления приборной траектории и ЦКД необходимо учитывать то, что ориентация и положение объекта в начальной точке неизвестны (или известны весьма неточно). Следовательно, эти параметры не фигурируют в математическом описании формируемых признаков. В ходе исследований были проанализированы многие возможные варианты искомых признаков. Их рациональный выбор включает длины отрезков и приращения углов

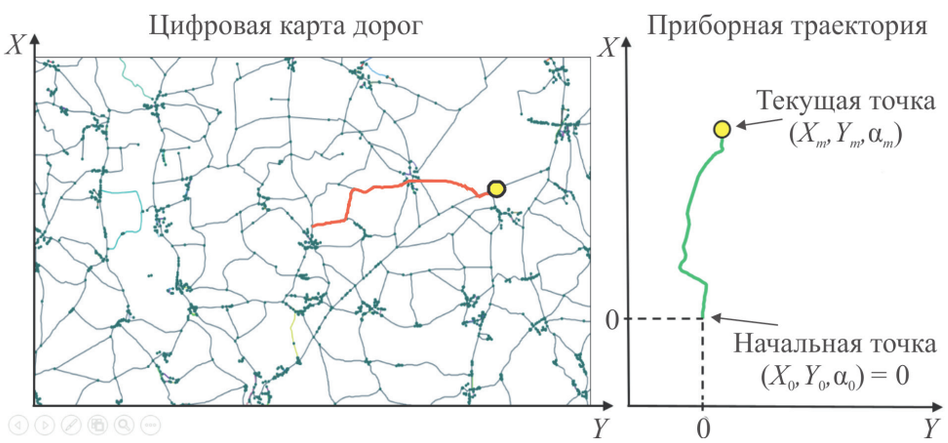



**Рис. 1.** К постановке задачи начальной выставки СНН по данным ЦКД

ориентации между отрезками с общей точкой, которые инварианты к повороту и смещению. Анализ различных вариантов математического описания признаков и их последующего использования показал, что хорошие результаты решения задачи получаются для комбинации:

$$\bar{z} = [X, Y, \Delta\alpha, S_1, S_2], \quad (1)$$

где $X$, $Y$ – координаты $i$-й или $j$-й точки ЦКД или приборной траектории СНН, соответственно;
$\Delta\alpha$ – приращение дирекционного угла между отрезками;
$S_1$ и $S_2$ – длины отрезков, для которых указанная точка является общей.

Выбранные параметры для одной из точек проиллюстрированы на *рисунке 2*.

Математическое описание меры близости данных СНН и ЦКД более всего зависит от метода, который используется для последующего решения оптимизационной задачи выбора отрезков. Анализ известных методов показал возможность нахождения быстрого решения задачи с использованием ДТВШ [4-7]. Однако в алгоритме ДТВШ «стандартные» меры близости (среднеквадратичная, манхэттенская и др.) не могут быть непосредственно использованы, поскольку параметры признаков близости имеют разный физический смысл согласно (1). В связи с этим, целесообразно использовать меру близости – вероятность совпадения $i$-й точки ЦКД с $j$-й точкой приборной траектории СНН, которая может быть найдена из функции правдоподобия:

$$C_q = 1 - \exp\left[-0{,}5\left(\bar{z}_{ki} - \bar{z}_{pj}\right)\left(P_k + P_p\right)^{-1}\left(\bar{z}_{ki} - \bar{z}_{pj}\right)^T\right], \quad (2)$$

где $\bar{z}_{ki}$, $\bar{z}_{pj}$ – рассчитываемые по (1) векторы для $i$-й точки ЦКД и $j$-й точки приборной траектории соответственно;
$P_p$, $P_k$ – соответствующие ковариационные матрицы.

Таким образом, формируется матрицы, размером $j$ на $i$, характеризующей близость отдельных участков приборной траектории к конкретным отрезкам ЦКД. Для примера, такой массив данных представлен на *рисунке 3*, для простоты и наглядности сопоставление произведено только по приращениям дирекционных углов, так как для остальных параметров сопоставление выглядит аналогичным образом.

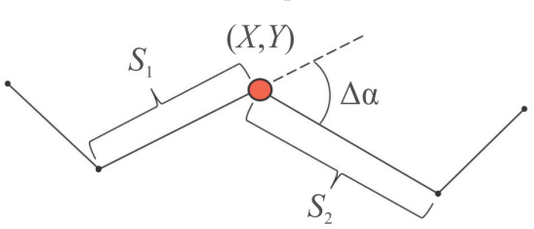



**Рис. 2.** Признаки, характеризующие каждую точку приборной траектории и ЦКД

На *рисунке 3* оранжевым цветом выделены ячейки матрицы, обладающие максимальным правдоподобием, совокупность которых характеризует оптимальное решение. При этом, особенностью алгоритма ДТВШ является то, что значение меры близости должны быть связаны между собой, то есть должны иметь строгую последовательность, что исключает ошибки алгоритма при схожести небольшого участка. Искомая мера близости определяется как сумма минимальных значений $C_q$ по $j$-м точкам траектории СНН.

Окончательно, алгоритм ДТВШ позволяет найти совокупность отрезков ЦКД $K_n^*$ по координатам ЦКД и навигационным параметрам СНН, выработанным при нулевых начальных координатах и ориентации, а также их характеристикам погрешностей. Найденная совокупность отрезков ЦКД соответствует приборному маршруту объекта. На основании этого координаты конечной точки последнего отрезка являются текущими координатами местоположения объекта в системе координат ЦКД. Угол начальной азимутальной ориентации вычисляется решением обратной геодезической по координатам концов выбранных отрезков и используется для «разворота» выработанной СНН приборной траектории объекта в системе координат ЦКД.

Упрощенный пример имитации процедуры начальной выставки СНН по ЦКД с помощью алгоритма ДТВШ приведен на *рисунке 4*, где показан фрагмент приборной траектории и три (для простоты) возможных маршрута ЦКД, каждому из которых соответствует своя мера близости $C$. На *рисунке 4а* показан приборный маршрут с минимальным значением $C$, что позволяет выбрать его для нахождения начальных (и впоследствии текущих) координат и ориентации объекта. Утолщенной линией на *рисунке 4а* показано, что координаты конечной точки последнего отрезка выбранного маршрута ЦКД являются текущими координатами местоположения объекта, обозна-

**Рис. 3.** Пример, иллюстрирующий принцип работы алгоритма ДТВШ при сопоставлении углов ориентации СНН и отрезков ЦКД

ченного желтым цветом. На *рисунке 4б* представлены участки ЦКД, не совпадающие с приборной траекторией объекта, что подтверждается значением меры близости *C*.

**Заключение**

Таким образом, решена задача нахождения начальных координат и ориентации автономной СНН путем сопоставления данных ЦКД и текущей навигационной информации, получаемой на коротком начальном участке маршрута движения наземного объекта. В основу решения положен алгоритм динамической трансформации временной шкалы. В соответствии с его исходными данными и ограничениями, а также особенностями доступной информации СНН и ЦКД обоснованы признаки для сопоставления приборной траектории и ЦКД и определена соответствующая мера близости. Приведен числовой пример решения задачи начальной выставки автономной СНН по данным ЦКД. Дальнейшим направлением работы является исследование зависимости качества результатов решаемой задачи от протяженности начального участка маршрута наземного объекта.

**Литература**

1. Кузовков Н.Т., Салычев О.С. Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация. М.: Машиностроение, 1982. 216 с.
2. Беркович С.Б. Коррекция автономных наземных навигационных систем в движении по отдельным точкам ЦКД / С.Б. Беркович [и др.] // 13-я С.- Петербургская межд. конф. по интегрированным навиг. системам. Спб: ГНЦ РФ–ЦНИИ «Электроприбор», 2006. С.154-156.
3. Садеков Р.Н. Применение цифровых карт дорог для автономной коррекции систем наземной навигации // Труды ФГУП «НПЦ АП» М., 2008. №2. С.87-95.
4. Белоглазов И.Н. Основы навигации по геофизическим полям / Белоглазов И.Н., Джанджгава Т.И., Чигин Г.П. М.: Наука, 1985. 428с.
5. Шолохов А.В. Определение текущего местоположения объекта по цифровым картам дорог без начальной настройки навигационной системы счисления пути // Материалы III конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2001. С.157-164.
6. Vintsyuk T.K. Speech discrimination by dynamic programming. Kibernetika, 4(2), 81-88, January-February, 1968.
7. Rabiner L., Juang B.H. Fundamentals of Speech Recognition. Prentice Hall PTR, 1993.
8. Степанов О.А. Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации. СПб., 1998. 370 с.
9. Шолохов А.В., Ливенцев В.А. Сравнительный анализ способов построения алгоритмов коррекции наземных навигационных систем по цифровым картам дорог // Метрология, 2007. №1. С.19-28.
10.Таха Х.А. Введение в исследование операций. М.: Вильямс, 2005. 912 с.
11. David G. Lowe. Object recognition from local scale-invariant features // Proceedings of the International Conference on Computer Vision. 1999. T.2. C.1150-1157.
12. Harris C. And Stephens M. A combined corner and edge detector // In Fourth Alvey Vision Conference, Manchester, UK, 1998. Pp.147-151.
13. Herbert Bay, Tinne Tuytelaars, Luc Van Gool – SURF: Speeded Up Robust Features, ETH Zurich, Katholieke Universiteit Leuven.
14. Stefan Leutenegger, Margarita Chli and Ronald Siegwart: BRISK: Binary Robist Invariant Scalable Keypoints. ICCV, 2011. Pp.2548-2555.
15. E. R. a. T. Drummond. Fusing Points and Lines for High Performance Tracking, 2005.
16. ГИС «Панорама»: [Электронный ресурс] // КБ «Панорама». URL: https://gisinfo.ru/ products/ products_ panorama.htm. (Дата обращения: 30.01.2022).

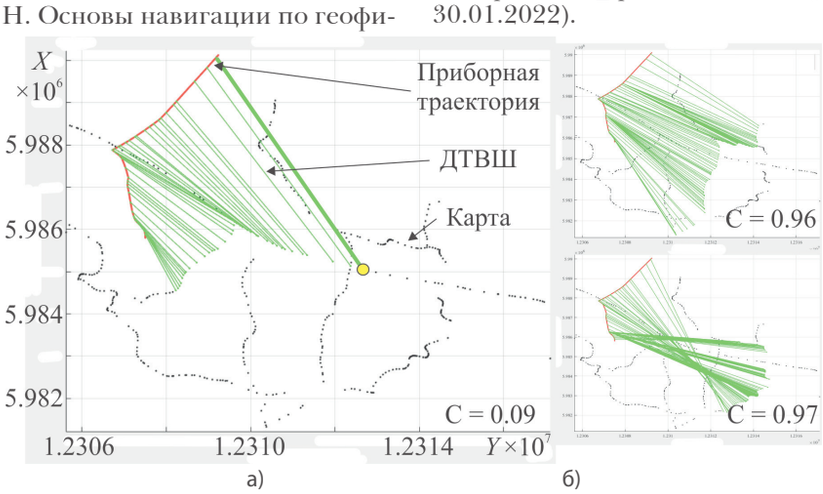



**Рис. 4.** Результаты имитационного моделирования начальной выставки СНН по ЦКД

УДК 621.398.8

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИМИТОЗАЩИЩЕННОГО КАНАЛА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ СТЕГАНОГРАФИЧЕСКИМИ СПОСОБАМИ

# MATHEMATICAL MODEL OF IMITO–PROTECTED DATA TRANSMISSION CHANNEL BY STEGANOGRAPHIC METHODS

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

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

Александр Владимирович Попов
адъюнкт кафедры
филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел.: +7 (4967) 72-19-11

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

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

**Аннотация**
В статье представлена математическая модель канала передачи данных, использующего способ стеганографической имитозащиты данных в условиях воздействия имитирующей помехи. Получены статистические характеристики имитозащищенности, которые учитывают параметры стеганоконтейнера, двоичных и недвоичных корректирующих кодов и скремблирующей псевдослучайной последовательности.
**Ключевые слова:** стеганоконтейнер, последовательности Уолша-Адамара, основание корректирующего кода, скремблер, псевдослучайная последовательность, корреляционный декодер, недвоичный декодер.

**Summary**
The article presents a mathematical model of a data transmission channel using the method of steganographic imitation of data protection under the influence of imitating interference. Statistical characteristics of imitation security are obtained, which take into account the parameters of the steganocontainer, binary and non-binary correction codes, and a scrambling pseudo-random sequence.
**Keywords:** steganocontainer, Walsh-Hadamard sequences, correction code base, scrambler, pseudo-random sequence, correlation decoder, non-binary decoder.

Известны преимущества цифровых систем передачи информации перед аналоговыми [1]. Однако существует серьезный недостаток цифровых систем передачи, который перечеркивает их многочисленные достоинства. Это легкость модификации, подделки содержания цифровых сообщений.

Для защиты от угрозы подделки цифровых сообщений применяют средства имитозащиты передаваемых данных.

Традиционно такие средства строятся на основе криптографических методов [1]. В свою очередь криптографические методы имеют свой принципиальный недостаток – они требуют каналов передачи данных, у которых вероятность битовой ошибки $P_b$ близка к нулю. Это приводит к необходимости использования сложных методов модуляции сигналов и кодирования данных, которые используют сигналы с расширенным спектром и высоким энергетическим

потенциалом [1, 3]. Поэтому актуальна задача по разработке способов имитозащиты, способных работать в каналах передачи данных, подверженных влиянию различного рода помех. Известно [2, 3], что способы имитозищиты, основанные на стеганографии, потенциально обладают высокой помехоустойчивостью и способны обеспечивать вероятность правильной подделки сообщений $P_{П} \le 10^{-9}$.

Известна структурная схема системы передачи информации с кодовым уплотнением данных (*рисунок 1*) [2,4], которая способна обеспечивать стеганографическую имитозащиту.

На передающей стороне данные поступают на вход недвоичного кодирующего устройства (НКУ), формирующего известный корректирующий код Рида-Соломона с параметрами:

- $N$ – длина кода;
- $K$ – число информационных символов;
- $D_{min}=N-K$ – минимальное кодовое расстояние, которое позволяет исправлять $T_n=D_{min}/2$ недвоичных ошибок;

$q$ – основание кода равное 256 (недвоичный символ кода содержит $n=log_2256=8$ двоичных символов).

Блок уплотнения данных (БУД) совместно с генератором ортогональных двоичных последовательностей Уолша-Адамара $Wal_i(t), i=\overline{1,...n}$, образует стеганоконтейнер и формирует многоуровневый групповой сигнал, который переносит $n$ двоичных символов.

Информационный модулятор (ИМ) совместно с генератором гармонических колебаний (G) создает аналоговый модулированный сигнал с угловой модуляцией, который поступает на первый вход скремблирующего модулятора (СМ), а на второй вход СМ поступает псевдослучайная последовательность (ПСП) с выхода генератора ПСП. Длина ПСП равна $B$ двоичных символов, при этом $B \ge n$.

На приемной стороне на входе детектора (Д) скремблированного сигнала действует аддитивная смесь полезного сигнала (или имитированного сигнала) и помех $n(t)$.

Информационный демодулятор (ИД) выделяет принятый многоуровневый групповой сигнал с возможными искажениями, а корреляционный декодер (КДК) совместно с полярным генератором $Wal_i^{(n)}(t)$ выделяет $n$ – разрядный параллельный двоичный код, соответствующий недвоичному символу кода Рида-Соломона.

Недвоичный декодер (НДК) обнаруживает и исправляет возможные ошибки в принятых недвоичных комбинациях кода Рида-Соломона и выдает данные получателю сообщений.

Имитозащищенность такой системы передачи будет определяться тремя ступенями защиты и равна $P_{П}=P_{ПСП} \cdot P_W \cdot P_{НК}$, где $P_{ПСП}$ – вероятность правильной подделки злоумышленником ПСП; $P_W$ – вероятность правильной подделки злоумышленником ортогональных последовательностей; $P_{НК}$ – вероятность правильной подделки недвоичного кода.

Вероятность $P_{ПСП}$ равна

$$P_{ПСП} = \frac{1}{2^B} \sum_{i=0}^{t} C_B^i,$$

где $t=log_2B$ и предполагает, что, если злоумышленник правильно определил первые $t$ двоичные символы ПСП, то код ПСП раскрыт с вероятностью $P_{ПСП}$.

В *таблице 1* определены значения $B$ и соответствующие им параметры $t$ и $P_{ПСП}$.

Анализ результатов, представленных в *таблице 1*, показывает, что увеличение длины ПСП ($B \ge 256$) позволяет получить сколь угодно малое значения вероятности подделки $P_{ПСП}$. Однако надо помнить о том, что спектр сигнала будет расширяться и потребуется либо канал передачи с достаточно широкой полосой пропускания, либо увеличение времени передачи сообщения.

***Замечание.*** При $B=const$ увеличение $t$ ($t>\log_2B$) приводит к увеличению вероятности $P_{ПСП}$, при уменьшении $t$ ($t<\log_2B$) вероятность $P_{ПСП}$ уменьшается. Например, при $B=16$, $t=6$ значение $P_{ПСП}=0{,}227$, а при $t=2$ значение $P_{ПСП}=2{,}09 \cdot 10^{-3}$

Таким образом, увеличение длины ПСП ($B \ge 64$) позволяет значительно уменьшить вероятность правильной подделки $P_{ПСП}$.

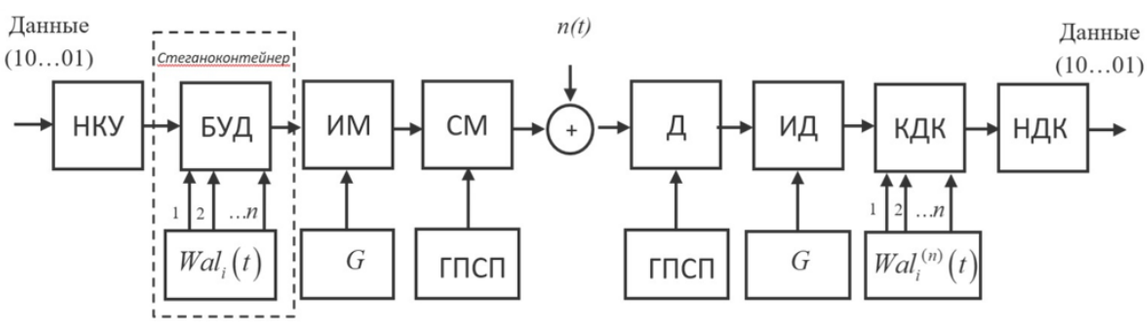



**Рис. 1.** Структурная схема системы передачи информации

**Таблица 1**

Значения $P_{ПСП}$ и параметры $B$ и $t$

| $B$ | $t$ | $P_{ПСП}$ |
|---|---|---|
| 8 | 3 | 0,363 |
| 16 | 4 | 0,038 |
| 32 | 5 | $5{,}6564\cdot10^{-5}$ |
| 64 | 6 | $4{,}515\cdot10^{-12}$ |
| 128 | 7 | $2{,}9388\cdot10^{-28}$ |
| 256 | 8 | $3{,}655672909\cdot10^{-63}$ |

Вероятность $P_W$ определяется выражением

$$P_W = \frac{1}{K_w!2^{n^2}}\sum_{i=0}^{K_w} C^i_{n^2},$$

где $K_w$ – разрядность структурного блока, который лежит в основе построения матрицы Уолша-Адамара и его требуется подделать

$$H_4 = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix} \to K_w = 4; \quad H_{16} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \to K_w = 16,$$

где $n$ – длина строки и длина столбца матрицы Уолша-Адамара, определяющие число элементов ($n^2$) в матрице.

Если правильно подделан элемент $H_4$, то для $n$=8 получим $P_W$=1,534·10$^{-15}$.

Таким образом, наличие стеганоконтейнера (блока уплотнения данных) значительно снижает вероятность подделки сообщения. При этом увеличение длины $n$ способствует уменьшению вероятности правильной подделки.

Вероятность $P_{НК}$ будет определяться выражением

$$P_{ПСП} = \frac{1}{2^B}\sum_{i=0}^{t} C^i_B,$$

где $q$ – основание недвоичного кода (при $n$=8 основание $q=2^8=256$);
$N$ – длина кода;
$T_n$ – число недвоичных ошибок, которые обнаруживает и исправляет код;

$P_q$ – вероятность ошибочного приема недвоичного символа кода, которая определяет вероятность кажущегося правильного приема кодовой комбинации (имитации правильного приема), вызванную действием имитирующих помеховых сигналов (гармонических сигналов), равная для когерентного приема фазоманипулированных сигналов

$$P_q = 1 - \left(1 - \frac{1}{\sqrt{3{,}14}} \int_{\frac{1}{\sqrt{h_S^2 + \frac{P_I}{P_C \cdot B}}}}^{\infty} e^{-t^2} dt\right)^{\log_2 q},$$

где $h^2_s$ – символьное отношение сигнал/шум, равное $h^2_s = h^2_b \log_2 q$;
$h^2_b$ – битовое отношение сигнал/шум;
$P_П/P_C$ – отношение мощности помехи ($P_П$) и сигнала ($P_C$).

В *таблице 2* представлены оценки $P_{нк}$ для известных недвоичных кодов ($q$=256) Рида-Соломона [1] и соответствующие им значения вероятностей $P_q$, отношений $h^2_b$, $P_П/P_C$ и величины $B$.

Анализ *таблицы 2* показывает:

- параметры кода в значительной степени определяют вероятность $P_{нк}$. Например, недвоичный код (255,135,120) допускает более высокую вероятность $P_q$ попадания имитационной помехи на разряды кодовой комбинации по сравнению с кодом (31,15,16);
- чем с большим отношением $h^2_b(h^2_S)$ работает система передачи данных, тем меньшее значение вероятности $P_{нк}$;
- следует выбирать такие параметры кодирования данных, при которых будет выполняться требование по вероятности $P_{нк}$=*const* с меньшим

**Таблица 2**

Оценки вероятностей $P_{нк}$ для недвоичных ($q$=256) кодов

| Длина кода $N$=255, число информационных символов $K$=135, минимальное кодовое расстояние $D_{min}$=120, $T_n$=60 | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $P_{нк}$ | $P_q$ | $n=\log_2 q$ | $B$ | $h^2_b$ | $h^2_s=nh^2_b$ | $P_П/P_C$ | $P_П/P_C$ | $h^2_b$ |
| $1{,}31\cdot10^{-6}$ | 0,129 | 8 | 8 | 0,325 | 2,6 | 0,5 | 2,5 | 0,935 |
| $10^{-8}$ | 0,1127 | 8 | 8 | 0,346 | 2,768 | 0,5 | 2,5 | 1,135 |
| $1{,}45\cdot10^{-10}$ | 0,1 | 8 | 8 | 0,363 | 2,904 | 0,5 | 2,5 | 1,358 |
| $1{,}56\cdot10^{-12}$ | 0,0904 | 8 | 8 | 0,38 | 3,04 | 0,5 | 2,5 | 1,61 |
| $1{,}3\cdot10^{-14}$ | 0,081 | 8 | 8 | 0,4 | 3,2 | 0,5 | 2,5 | 1,97 |
| $1{,}65\cdot10^{-16}$ | 0,0734 | 8 | 8 | 0,417 | 3,336 | 0,5 | 2,5 | 2,46 |
| Длина кода $N$=31, число информационных символов $K$=15, $D_{min}$=16, $T_n$=8 | | | | | | | | |
| $P_{нк}$ | $P_q$ | $n$ | $B$ | $h^2_b$ | $h^2_s=nh^2_b$ | $P_П/P_C$ | | |
| $1{,}046\cdot10^{-6}$ | 0,0362 | 8 | 8 | 0,423 | 3,384 | 2,5 | | |
| $10^{-8}$ | 0,021 | 8 | 8 | 0,4853 | 3,8824 | 2,5 | | |
| $1{,}174\cdot10^{-10}$ | 0,0125 | 8 | 8 | 0,546 | 4,368 | 2,5 | | |
| $1{,}084\cdot10^{-12}$ | 0,00735 | 8 | 8 | 0,605 | 4,84 | 2,5 | | |
| $10^{-15}$ | 0,00335 | 8 | 8 | 0,695 | 5,56 | 2,5 | | |

$h^2_b$ и большими отношениями $P_П/P_С$ (в *таблице* таким является недвоичный код (255,135,120), который при $P_П/P_С$=2,5, $P_{нк}$=1,65·10$^{-16}$ требует $h^2_b$=2,46).

Для сравнения результатов в *таблице 3* представлены оценки вероятностей $P_{нк}$ для известных двоичных кодов ($q$=2) БЧХ [1] и соответствующие им значения вероятностей $P_q=2P_0$.

Анализ *таблицы 3* показывает:

- двоичные коды БХЧ обеспечивают $P_{нк}=const$ при меньших значениях $P_q=2P_0$ по сравнению с недвоичными кодами Рида-Соломона. Например, при равных скоростях кодирования

$$\frac{K}{N}\simeq\frac{k}{n}$$

недвоичный код (255, 135, 120, $q$=256) обеспечивает $P_{нк}$=1,56·10$^{-12}$ при $P_q$=0,0904, а двоичный код (255, 131, 37, $q$=2) обеспечивает $P_{нк}$=1,027·10$^{-12}$ при $P_q$=0,01664;

- системы передачи данных с двоичными кодами допускают имитационную помеху с отношением $P_П/P_С$=1,2 (недвоичные – $P_П/P_С$=2,5), а отношения $h^2_B$ соизмеримые.

Таким образом, недвоичные коды имеют серьезные преимущества, по сравнению с двоичными, для обеспечения имитозащищенности каналов передачи данных.

## Выводы

1. При использовании недвоичных кодов Рида-Соломона ($q$=256) возможно использование ортогональных двоичных последовательностей только с длиной $n$=8. При отсутствии расширения спектра сигнала $B=n$ получим значения вероятностей $P_П$=0,363·1,534·10$^{-15}$·$P_{нк}$, где вероятность $P_{нк}$ определяется выбранным кодом.

2. При расширении спектра сигнала (коэффициент расширения спектра сигнала равен $K_s=B/n$) значение вероятности $P_{ПСП}$ уменьшается (для $K_s$=64/8=8 вероятность $P_{ПСП}$=4,515·10$^{-12}$) и вероятность подделки сообщения $P_П$=4,515·10$^{-12}$·1,534·10$^{-15}$·$P_{нк}$ уменьшается на 11 десятичных порядков.

3. Кодовое уплотнение данных позволяет уменьшить коэффициент расширения спектра сигнала в $n$ раз по сравнению с известными способами расширения спектра прямой модуляцией сигнала ПСП с длиной $B$, при этом вероятность подделки сообщения уменьшится на 15 десятичных порядков.

## Литература

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е изд: пер с англ. М. ООО «И.Д.Вильямс», 2017. 1100 с.

2. Зеленевский В.В., Зеленевский Ю.В., Черноусов М.С., Зеленевский А.В. Метод оценки помехоустойчивости цифровых систем передачи с кодовым уплотнением данных при воздействии стационарных помех //Известия Института инженерной физики, 2020. №4(58). С.31-36

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

4. Зеленевский В.В., Зеленевский Ю.В., Зеленевский А.В., Дурнов А.С. Каскадное кодирование данных с параллельными ортогональными внутренними кодами // Известия Института инженерной физики, 2018. №3(49). С.46-49.

**Таблица 3**

Оценки вероятностей $P_{нк}$ для двоичных кодов БЧХ

| Параметры двоичного кода ($n,k,d_{min}$) | Значения $P_{нк}$, $P_q$, $P_0$ | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| (255,131,37) | $P_0$ | 0,0198 | 0,0147 | 0,011 | 0,00832 |
| | $P_q$ | 0,0396 | 0,0294 | 0,022 | 0,01664 |
| | $P_{нк}$ | 1,106·10$^{-6}$ | 1,216·10$^{-8}$ | 1,132·10$^{-10}$ | 1,027·10$^{-12}$ |
| (255,37,91) | $P_0$ | 0,0863 | 0,0731 | 0,063 | 0,05445 |
| | $P_q$ | 0,1726 | 0,1462 | 0,126 | 0,1089 |
| | $P_{нк}$ | 1,515·10$^{-6}$ | 1,309·10$^{-8}$ | 1,253·10$^{-10}$ | 9,933·10$^{-13}$ |
| (127,64,21) | $P_0$ | 0,0132 | 8,17·10$^{-3}$ | 5,25·10$^{-3}$ | 3,44·10$^{-3}$ |
| | $P_q$ | 0,0264 | 1,634·10$^{-2}$ | 1,05·10$^{-2}$ | 6,88·10$^{-3}$ |
| | $P_{нк}$ | 1,157·10$^{-6}$ | 10$^{-8}$ | 1,063·10$^{-10}$ | 1,232·10$^{-12}$ |
| (127,36,31) | $P_0$ | 0,0291 | 0,02 | 0,015 | 0,011 |
| | $P_q$ | 0,0582 | 0,04 | 0,03 | 0,022 |
| | $P_{нк}$ | 10$^{-6}$ | 6,55·10$^{-9}$ | 1,112·10$^{-10}$ | 1,185·10$^{-12}$ |
| (255,131,37) $n=B=8$, $P_П/P_С$=1,2 | $h^2_B$ | 0,82224 | 0,964 | 1,13 | 1,324 |
| | $h^2_S=8h^2_B$ | 6,578 | 7,712 | 9,04 | 10,592 |
| | $P_0$ | 0,0198 | 0,0147 | 0,011 | 0,00832 |
| | $P_{нк}$ | 1,106·10$^{-6}$ | 1,216·10$^{-8}$ | 1,132·10$^{-10}$ | 1,027·10$^{-12}$ |

УДК 623.746.4–519; 621.396.969; 621.391

# АЛГОРИТМ И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В МНОГОПОЗИЦИОННОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ ОБНАРУЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ*

# ALGORITHM AND RESULTS OF MODELING THE SIGNAL PROCESSING PROCESS IN A MULTI-POSITION RADAR STATION FOR DETECTING UNMANNED AERIAL VEHICLES

Денис Сергеевич Чиров
*доктор технических наук, доцент*
заведующий кафедрой
ФГБО ВО «МТУСИ»
Адрес: 111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а
Тел.: +7 (499) 184-19-03
E-mail: d.s.chirov@mtuci.ru

Константин Юрьевич Рюмшин
*доктор технических наук*
ведущий научный сотрудник
ФГБОУ ВО «МТУСИ»
Адрес: 111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а
Тел.: +7(499)184-19-03
E-mail: e8@mail.ru

Юрий Анатольевич Кочетков
ведущий сотрудник
ФГБОУ ВО «МТУСИ»
Адрес: 111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а
Тел.: +7 (499) 184-19-03
E-mail: y.a.kochetkov@mtusi.ru

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

**Аннотация**

В статье рассмотрены методы пространственно-временной обработки ансамблей широкополосных сигналов и многопозиционные системы применительно к беспилотным летательным аппаратам. Использование данных методов обуславливается использованием беспилотных летательных аппаратов в общей концепции «умный город», а также возможностью несанкционированного применения беспилотных летательных аппаратов. Рассматриваются реализационные аспекты создания системы глобального мониторинга воздушного пространства в рамках «умного города». Одним из наиболее эффективных методов контроля воздушного пространства является использование многопозиционных широкополосных радиолокационных средств, которые отличает всепогодность и возможность обеспечения круглосуточного контроля пространства. Обусловлены преимущества многопозиционных радиолокационных систем в обнаружении флуктуирующих целей в сравнении с традиционными однопозиционными системами, возможность их технической реализации, а также использование в многопозиционных системах ансамблей широкополосных сигналов. Существование возможности при реализации различных вариантов построения многопозиционных систем обнаружения, различающихся количеством и топологией расположения передающих и приемных пунктов (близко расположенных или широко разнесенных в пространстве) и, соответственно, количеством и типом излучаемых сигналов, способом обработки сигналов (когерентная, некогерентная, централизованная, децентрализованная), приводит к различным вариантам пространственно-временной обработки сигналов. Целью статьи является разработка алгоритма централизованной обработки сигналов в многопозиционной радиолокационной станции обнаружения беспилотных летательных аппаратов и оценка его эффективности методом математического моделирования.

**Ключевые слова:** «умный город», беспилотные летательные аппараты, ансамбль сигналов, широкополосные сигналы, контроль пространства, многопозиционные системы.

**Summary**

The article discusses the methods of spatio-temporal processing of ensembles of broadband signals and multi-position systems as applied to unmanned aerial vehicles. The use of these methods is due to the use of unmanned aerial vehicles in the general concept of «smart city», as well as the possibility of unauthorized use of unmanned aerial vehicles. The article discusses the implementation aspects of creating a global airspace monitoring system within the «smart city». One of the most effective methods of airspace control is the use of multi-position broad-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-06006.

band radar facilities, which are distinguished by all-weather conditions and the ability to provide round-the-clock control of the space. The advantages of multi-position radar systems in detecting fluctuating targets in comparison with traditional single-position systems, the possibility of their technical implementation, as well as the use of ensembles of broadband signals in multi-position systems are determined. The existence of the possibility for the implementation of various options for constructing multi-position detection systems, differing in the number and topology of the location of transmitting and receiving points (closely spaced or widely spaced in space) and, accordingly, the number and type of emitted signals, the method of signal processing (coherent, incoherent, centralized, decentralized ), leads to different variants of space-time signal processing. The purpose of the article is to develop an algorithm for centralized processing of signals in a multi-position radar station for detecting unmanned aerial vehicles and to evaluate its effectiveness using the method of mathematical modeling.

**Keywords:** «smart city», unmanned aerial vehicles, signal ensemble, broadband signals, space control, multi-position systems.

**Введение**

Популярная в настоящее время концепция «умный город» предполагает широкое использование различных беспилотных летательных аппаратов (далее – БЛА) для решения широкого класса задач [1,2]. Несанкционированное применение БЛА может привести к угрозам функционирования «умного города», так как система управления беспилотными транспортными средствами «умного города» не учитывает наличие БЛА-нарушителей и, соответственно, не способна оперативно реагировать на возникшие угрозы [3]. Решение данной проблемы может стать создание системы глобального мониторинга воздушного пространства в рамках «умного города». Одним из наиболее эффективных методов контроля воздушного пространства является использование многопозиционных широкополосных радиолокационных средств [4,5]. Данные средства являются всепогодными и могут обеспечивать круглосуточный контроль пространства.

В настоящее время методы пространственно-временной обработки ансамблей широкополосных сигналов широко исследуются за рубежом и в России [6-8]. Это обусловлено возможностью технической реализации на современном этапе преимуществ многопозиционных радиолокационных систем в обнаружении флуктуирующих целей в сравнении с традиционными однопозиционными системами. Использование в многопозиционных системах ансамблей широкополосных сигналов также позволяет обеспечить:

- уменьшение влияния флуктуаций эффективной площади рассеивания на вероятность обнаружения целей;
- повысить разрешающую способность и точность измерения координат;
- повысить помехоустойчивость радиолокационной системы;
- более высокие возможности по обнаружению малоскоростных целей;
- возможностью использования набора ортогональных и широкополосных зондирующих сигналов в радиолокационных системах с несколькими передающими и приемными пунктами.

Существует возможность реализации различных вариантов построения многопозиционных систем обнаружения, различающихся количеством и топологией расположения передающих и приемных пунктов (близко расположенных или широко разнесенных в пространстве) и, соответственно, количеством и типом излучаемых сигналов, способом обработки сигналов (когерентная, некогерентная, централизованная, децентрализованная). Все это приводит к различным вариантам пространственно-временной обработки сигналов.

По степени когерентности сигналов, принимаемых на различных приемных пунктах от одного и того же передающего устройства, многопозиционные системы различают на пространственно когерентные и пространственно некогерентные [9]. У пространственно когерентных систем, как правило, приемные элементы (позиции) располагаются на небольшом расстоянии друг от друга, что позволяет им находиться в пределах одного лепестка диаграммы вторичного рассеяния радиолокационной цели. У пространственно некогерентных систем обычно это условие не выполняется за счет большого удаления приемных позиций друг от друга или топологии размещения на местности относительно радиолокационной цели. Возможен также вариант, при котором часть приемных позиций многопозиционной системы будет обладать пространственной когерентностью, другая нет.

Многопозиционные системы различаются также по способу межпозиционной обработки принимаемых сигналов. Централизованная обработка предполагает совместную первичную (когерентную, некогерентную) обработку принимаемых различными позициями реализаций сигналов и на их основе принятие решения об обнаружении цели. Децентрализованная обработка предполагает осуществление первичной обработки и принятия решения о превышении порога обнаружения сигнала производить на

каждой позиции, а окончательное решение об обнаружении цели осуществляется на основании выполнения критерия $k$ из $m$ (где $k$ – количество приемных пунктов на которых превышен порог обнаружения для данного элемента разрешения, $m$ – общее количество приемных позиций по которым принимается решение).

Целью данной статьи является разработка алгоритма централизованной обработки сигналов в многопозиционной радиолокационной станции (далее – РЛС) обнаружения беспилотных летательных аппаратов и оценка его эффективности методом математического моделирования.

### 1. Алгоритм централизованной обработки сигналов в многопозиционной РЛС обнаружения беспилотных летательных аппаратов

Будем полагать, что разнесенная многопозиционная радиолокационная система состоит из $M_{tr}$ передающих и $M_{rec}$ приемных позиций. На каждой позиции мощность передающего устройства составляет $P_{tr}(i=1\ldots M_{tr})$ Вт. В качестве зондирующих сигналов используется ансамбль из $M_{tr}$ ортогонально модулированных широкополосных сигналов. Использование ортогональных сигналов позволяет при приеме осуществлять их разделение по каждому передающему устройству. Тип модуляции зондирующих сигналов может быть фазовый (бинарными или многофазными кодовыми последовательностями), частотный (частотно-ортогональные сигналы) или комбинированный. Будем полагать, что на каждой приемной позиции может осуществляться прием всех $M_{tr}$ зондирующих сигналов.

Математическая модель широкополосного зондирующего сигнала, состоящего из последовательности из $L$ импульсов, модулированных бинарными или многофазными кодовыми последовательностями. Модель сигнала на входе $k$-го приемного устройства может быть представлена в виде

$$\dot{Y}_k(t)=\sum_{i=1}^{M_{tr}}\sum_{l=1}^{L}\propto_{ki}\dot{\xi}_{ki}\sqrt{P_i}S_i\left(t-\tau_{ki}-(l-1)T_p\right)exp\left\{j[2\pi(f_o+F_{D\,ki})\left(t-\tau_{ki}-(l-1)T_p\right)+\theta_i(t)]\right\}+n_k(t) \quad (1)$$

где $\propto_{ki}$ – канальный параметр сигнала, определяющий энергетические параметры сигнала на трассе распространения от передатчика до цели и от цели до приемного устройства

$$\propto_{ki}=\sqrt{\frac{G_{tr}G_{rec}\lambda^2}{(4\pi)^3R_{tr}^2R_{rec}^2}},$$

где $G_{tr}$, $G_{rec}$ – коэффициент усиления передающей и приемной антенны РЛС соответственно;

$\lambda$ – длина волны;

$R_{tr}$, $R_{rec}$ – дальность трассы распространения сигнала «передатчик-цель» и «цель-приемник» соответственно;

$\dot{\xi}_{ki}$ – комплексный коэффициент, учитывающий радиолокационные характеристики цели (диаграмму обратного рассеяния) при облучении цели $i$-м передающим устройством в направлении $k$-го приемного устройства,

$$\dot{\xi}_{ki}=\xi_{ki}exp\left\{\varphi_{t\,ki}\right\},$$

$\dot{\xi}_{ki}$ – амплитудный множитель (в общем случае случайный) диаграммы обратного рассеяния цели;

$\varphi_{t\,ki}$ – фазовый множитель (в общем случае случайный) диаграммы обратного рассеяния цели;

$P_i$ – мощность $i$-го передающего устройства;

$S_i(t)$ – нормированная огибающая сигнала;

$\tau_{ki}=(R_{tr\,i}+R_{rec\,k})/c$ – задержка сигнала на трассе распространения от $i$-го передающего устройства к $k$-му приемному устройству;

$T_p$ – период посылок импульсов;

$F_{D\,ki}$ – частота Доплера сигнала от $i$-го передающего устройства на $k$-м приемном устройстве;

$\theta_i(t)$ – закон фазовой модуляции зондирующего сигнала;

$L$ – количество накапливаемых импульсов в пачке.

Рассмотрим варианты централизованной обработки сигналов в многопозиционной радиолокационной системе в зависимости от наличия пространственной и временной когерентности принимаемых на позициях сигналов.

#### 1.1. Пространственно когерентные многопозиционные радиолокационные системы

Рассмотрим вариант приема и обработки эхосигналов БПЛА в пространственно когерентной многопозиционной системе. Для многопозиционной системы с пространственной когерентностью случайный фазовый множитель сигнала $\varphi_{tki}$ жестко связан для сигналов всех передающих позиций.

Известно, что структура оптимального обнаружителя сигнала определяется отношением правдоподобия (или логарифмом отношения правдоподобия) принимаемой смеси сигнала и шума и только шума. Будем полагать, что смесь сигнала и шума на приемных позициях имеют гауссово распределение вероятностей. Учитывая выполнение условия пространственной когерентности принимаемых сигналов от различных передающих устройств на приемных позициях, можно полагать, что комплексные коэффициенты $\dot{\xi}_{ki}$ в сигналах от различных

передатчиков будут коррелированны. Представим совместную плотность распределения принимаемых сигналов на $k$-ой приемной позиции с учетом ортогональности сигналов различных передающих позиций в виде:

$$p\left(\dot{\boldsymbol{Y}}(t)\right)=\prod_{i=1}^{M_{tr}}\prod_{l=1}^{L}p\left(\dot{\boldsymbol{Y}}_i\left(t-(l-1)T_p\right)\right)= \quad (2)$$

$$=\prod_{i=1}^{M_{tr}}\prod_{l=1}^{L}\frac{1}{\pi^n\left|\det\left(\dot{\boldsymbol{\Phi}}_i\right)\right|}exp\left\{-\dot{\boldsymbol{Y}}_i\left(t-(l-1)T_p\right)\dot{\boldsymbol{\Phi}}_i^{-1}\dot{\boldsymbol{Y}}_i^{H}\left(t-(l-1)T_p\right)\right\},$$

где $p\left(\dot{\boldsymbol{Y}}_i(t)\right)$ – плотность вероятностей принимаемой реализации сигнала $i$-го передающего устройства;

$\dot{\boldsymbol{\Phi}}_i$ – корреляционная матрица сигнала $i$-го передающего устройства;

$\dot{\boldsymbol{Y}}_i(t)$ – комплексная амплитуда принимаемой реализация сигнала $i$-го передающего устройства.

В общем случае совместная плотность распределения вероятностей принимаемых сигналов при централизованной обработке с учетом независимости принимаемых сигналов на каждой приемной позиции будет иметь вид:

$$p\left(\dot{\boldsymbol{Y}}(t)\right)=\prod_{k=1}^{M_{rec}}\prod_{i=1}^{M_{tr}}\prod_{l=1}^{L}\frac{1}{\pi^n\left|\det\left(\dot{\boldsymbol{\Phi}}_i\right)\right|}exp\left\{-\dot{\boldsymbol{Y}}_i\left(t-\right.\right.$$
$$\left.\left.-(l-1)T_p\right)\dot{\boldsymbol{\Phi}}_i^{-1}\dot{\boldsymbol{Y}}_i^{H}\left(t-(l-1)T_p\right)\right\}.$$

Для определения структуры устройства обработки сигналов представим совокупность принимаемых реализаций на $k$-й приемной позиции в виде вектора

$$\dot{\boldsymbol{Y}}_k(t)=\left\{\dot{\boldsymbol{Y}}_1(t)\ \ \dot{\boldsymbol{Y}}_2(t)\ldots\dot{\boldsymbol{Y}}_{M_{tr}}(t)\right\}.$$

Логарифм отношения правдоподобия для $k$-й приемной позиции может быть представлен в виде

$$ln\Lambda_k=\int_{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}}\dot{\boldsymbol{Y}}_k(t_1)\dot{\boldsymbol{\Phi}}_k^{-1}(t_1,t_2)\dot{\boldsymbol{S}}_k^{H}(t_2)dt_1dt_2-$$
$$-\frac{1}{2}\int_{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}}\dot{\boldsymbol{S}}_k(t_1)\dot{\boldsymbol{\Phi}}_k^{-1}(t_1,t_2)\dot{\boldsymbol{S}}_k^{H}(t_2)dt_1dt_2\ ,$$

где $\dot{\boldsymbol{\Phi}}_к$ – корреляционная матрица шумов приемного устройства;

$\dot{\boldsymbol{Y}}_k(t)=\dot{\boldsymbol{S}}_k(t)+\dot{\boldsymbol{n}}(t)$ – вектор принимаемых реализаций сигнала на $k$-й приемной позиции;

$\dot{\boldsymbol{S}}_k(t)$ - вектор ожидаемых сигналов на $k$-й приемной позиции;

$$\dot{\boldsymbol{S}}_k(t)=\left\{\dot{\boldsymbol{S}}_1(t)\ \ \dot{\boldsymbol{S}}_2(t)\ldots\dot{\boldsymbol{S}}_{M_{tr}}(t)\right\},$$

$\dot{\boldsymbol{n}}_k(t)$ – вектор шумов приемного устройства;

$T$ – интервал наблюдения.

Вследствие того, что шумы многоканального приемного устройства некоррелированы, корреляционная матрица $\dot{\boldsymbol{\Phi}}_к$ может быть представлена в виде

$$\dot{\boldsymbol{\Phi}}_к(t_1,t_2)=N_{ok}\boldsymbol{I}\delta(t_1,t_2),$$

где $N_{ok}$ – спектральная плотность мощности шума приемного устройства (полагаем, что шумы в каналах приемного устройства одинаковы);

$\boldsymbol{I}$ – единичная диагональная матрица;

$\delta(t_1,t_2)$ – дельта-функция.

С учетом этого, логарифм отношения правдоподобия обнаружителя на $k$-й приемной позиции может быть представлен в виде

$$ln\Lambda_k=\sum_{i=1}^{M_{tr}}\sum_{j=1}^{M_{tr}}\sum_{l=1}^{L}\left[\int_{0}^{T_c}\int\dot{Y}_{ki}(t_1)\dot{\boldsymbol{\Phi}}_k^{-1}(t_1,t_2)\dot{S}_{kj}^{*}(t_2)dt_1dt_2-\right.$$
$$\left.-\frac{1}{2}\int_{0}^{T_c}\int\dot{S}_{ki}(t_1)\dot{\Phi}_k^{-1}(t_1,t_2)\dot{S}_{kj}^{*}(t_2)dt_1dt_2\right]= \quad (3)$$
$$=\sum_{i=1}^{M_{tr}}\sum_{j=1}^{M_{tr}}\sum_{l=0}^{L-1}\left[\frac{1}{2\pi N_{ok}}\int_{0}^{T_c}\int\dot{Y}_{ki}(t_1)\ \dot{S}_{kj}^{*}(t_2)\delta(t_1,t_2)dt_1dt_2-\right.$$
$$\left.-\frac{1}{2\pi N_{ok}}\int_{0}^{T_c}\int\dot{S}_{ki}(t_1)I\dot{S}_{kj}^{*}(t_2)\delta(t_1,t_2)dt_1dt_2\right]=$$
$$=\sum_{i=1}^{M_{tr}}\sum_{j=1}^{M_{tr}}\sum_{l=0}^{L-1}\left[\frac{1}{N_{ok}}\int_{0}^{T_c}\dot{Y}_{ki}(t)\ \dot{S}_{kj}^{*}(t)dt-\frac{1}{N_{ok}}\int_{0}^{T_c}\dot{S}_{ki}(t)\ \dot{\boldsymbol{S}}_{kj}^{*}(t)dt\right].$$

Подставляя в (3) выражение для модели сигнала с бинарной фазовой модуляцией получаем выражение, определяющее алгоритм обработки сигнала на $k$-й приемной позиции:

$$ln\Lambda_k=\sum_{i=1}^{M_{tr}}\sum_{j=1}^{M_{tr}}\sum_{l=0}^{L-1}\left[\frac{\dot{\xi}_{ki}\sqrt{P_i}\,\alpha_{ki}}{N_{ok}}\int_{0}^{T_c}\dot{Y}_{ki}(t)\ \dot{S}_{kj}^{*}(t)exp\left\{-j\varphi_j\right\}\ exp\left\{-j2\pi f_o\left(t-\tau_{ki}-lT_p\right)\right\}\times\right.$$
$$\left.\times exp\left\{-j2\pi F_{Dki}\left(t-\tau_{ki}-lT_p\right)\right\}dt-\frac{2E_{c\,kij}}{N_{ok}}\right]=$$
$$=\sum_{i=1}^{M_{tr}}\sum_{j=1}^{M_{tr}}\sum_{l=0}^{L-1}\left[\frac{\dot{\xi}_{ki}\sqrt{P_i}\,\alpha_{ki}}{N_{ok}}\dot{\rho}_{kij}\left(\tau_{ki}-lT_p,F_{Dki}\right)-\frac{2E_{c\,kij}}{N_{ok}}\right], \quad (4)$$

где $\dot{\rho}_{kij}\left(\tau_{ki},F_{Dki}\right)$ – корреляционный интеграл для $i$-го сигнала передатчика и $j$-го «ожидаемого» сигнала с учетом времени запаздывания и частоты Доплера сигнала;

$E_{c\,kij}$ – энергия $i$-го сигнала на выходе $j$-го согласованного фильтра.

Выражение (4) определяет логарифм отношения правдоподобия для сигнала с полностью известными параметрами. Достаточная статистика будет состоять из суммы $M_{tr}$ откликов согласованных фильтров при $i=j,(I,j=1\ldots M_{tr})$ и $M_{tr}(M_{tr}\text{-}1)$ кросскорреляционных составляющих откликов ортогональных сигналов передающих позиций при $i\neq j,(I,j=1\ldots M_{tr})$. В силу ортогональности сигналов принимаемых от различных передающих позиций

$$\dot{\rho}_{kij}\left(\tau_{ki},F_{Dki}\right)\cong 0\ \text{ при } i\neq j,$$

логарифм отношения правдоподобия будет иметь вид:

$$ln\Lambda_k\cong\sum_{i=1}^{M_{tr}}\sum_{l=0}^{L-1}\left[\frac{\dot{\xi}_{ki}\sqrt{P_i}\,\alpha_{ki}}{N_{ok}}\dot{\rho}_{kii}\left(\tau_{ki}-lT_p,F_{Dki}\right)-\frac{2E_{c\,kii}}{N_{ok}}\right]. \quad (5)$$

Структурная схема согласованного фильтра последовательности из $L$ ортогональных фазомодулированных сигналов на $k$-й приемной позиции многопозиционной системы обнаружения имеет вид, приведенный на *рисунке 1*.

Таким образом, на каждой приемной позиции осуществляется выравнивание задержек откликов с учетом времени запаздывания эхо-сигналов на трассе распространения «передающее устройство – БЛА – приемное устройство», многоканальная согласованная фильтрация каждого из $M_{tr}$ возможных сигналов передающих позиций с учетом диапазона допплеровских частот сигнала с дальнейшим когерентным накоплением пачки импульсов в каждом канале. Учитывая тот факт, что доплеровские частоты сигналов, приходящих от разных позиций и от разных передающих устройств в общем случае, будут различаться, межканальное накопление сигнала должно осуществляться некогерентно. Для пространственно когерентных систем сигналы, принимаемые на различных приемных позициях от одного и того же передатчика в общем случае, будут коррелированны. Степень корреляции будет зависеть от различий в доплеровских частотах сигналов на различных приемных позициях. Вследствие близкого расположения приемных позиций в пространственно когерентных системах обнаружения, различия в доплеровских частотах сигналов будут незначительными, а принимаемые сигналы иметь достаточно хорошую корреляцию.

Для данного случая логарифм отношения правдоподобия для варианта централизованной обработки сигналов от различных приемных позиций может быть представлен в виде:

$$ln\Lambda = \sum_{k=1}^{M_{rec}} ln\Lambda_k = \sum_{k=1}^{M_{rec}} \iint_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \dot{\boldsymbol{Y}}_k(t_1)\dot{\boldsymbol{\Phi}}_k^{-1}(t_1,t_2)\dot{\boldsymbol{S}}_k^H(t_2)dt_1dt_2 - \frac{1}{2}\iint_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \dot{\boldsymbol{S}}_k(t_1)\dot{\boldsymbol{\Phi}}_k^{-1}(t_1,t_2)\dot{\boldsymbol{S}}_k^H(t_2)dt_1dt_2 .$$

В силу полученного ранее выражения для отношения правдоподобия применительно к обработке сигналов на приемных позициях (5), логарифм отношения правдоподобия для случая централизованной обработки в пространственно когерентной системе будет иметь вид:

$$ln\Lambda = \sum_{k=1}^{M_{rec}}\sum_{i=1}^{M_{tr}}\sum_{l=0}^{L-1}\left[\frac{\dot{\xi}_{ki}\sqrt{P_i}\,\propto_{k\,i}}{N_{ok}}\dot{\rho}_{k\,ii}\left(\tau_{k\,i}-lT_p,F_{D\,ki}\right)-\frac{2E_{c\,ki}}{N_{o\,k}}\right] \quad (6)$$

Таким образом, результатом централизованной обработки эхо-сигналов БЛА в пространственно когерентной многопозиционной системе обнаружения будет сумма выходных сигналов внутрипозиционной обработки с учетом выравнивания межпозиционных задержек сигналов и их нормировки по уровню шума на различных приемных позициях.

Структурная схема централизованной обработки эхо-сигналов БЛА в многопозиционной системе обнаружения для случая пространственно когерентной системы и использовании ортогонально модулированных сигналов приведена на *рисунке 2*.

### 1.2. Пространственно некогерентные многопозиционные радиолокационные MIMO системы

В большинстве случаев для многопозиционных систем с широко разнесенными приемными позициями и реальных радиолокационных целей условие пространственной когерентности системы не выполняется. Такая ситуация имеет

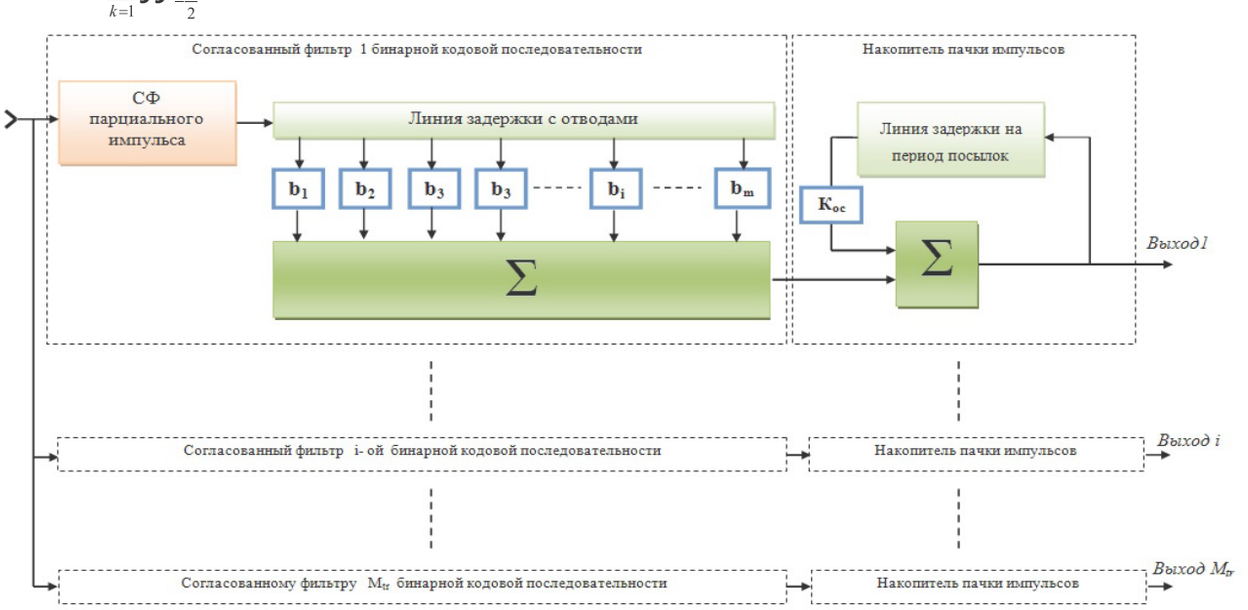



**Рис. 1.** Структурная схема устройства приема и обработки ортогональных фазомодулированных сигналов на приемной позиции многопозиционной системы обнаружения

место при обнаружении многопозиционной системой малоразмерных БЛА. Эхо-сигналы, принимаемые на различных позициях и от различных передающих устройств, имеют различную случайную амплитуду и фазу. В модели принимаемого сигнала с бинарной кодовой модуляцией (1) это учитывается комплексным коэффициентом $\xi_{ki}$. Принято считать, что фаза принимаемого сигнала $\varphi_{tki}$ распределена по равномерному закону, а амплитуда $|\xi_{ki}|$ соответствует закону распределения флуктуаций ЭПР по классификации Сверлинга. Поэтому учет флуктуаций принимаемых сигналов производят путем усреднения отношения правдоподобия по случайным параметрам $|\xi|$ и $\varphi_t$. Исходя из этого, выражение для отношения правдоподобия может быть записано в виде

$$\Lambda_k = \int\int \Lambda_k(\xi,\varphi)\, p(\xi)\, p(\varphi)\, d\xi d\varphi ,$$

где $\Lambda_k(\xi, \varphi)$ – условное отношение правдоподобия для случая пространственно-некогерентной MIMO системы обнаружения;

$p(\xi)$ – плотность распределения амплитуд отраженных сигналов;

$$p(\xi) = \frac{2\xi}{\bar{\sigma}} exp\left\{-\frac{\xi^2}{\bar{\sigma}}\right\}$$

– для модели флуктуаций Сверлинг1 (2); (7)

$$p(\xi) = \frac{8\xi^3}{\bar{\sigma}} exp\left\{-\frac{2\xi^2}{\bar{\sigma}}\right\}$$

– для модели флуктуаций Сверлинг3 (4); (8)

$p(\varphi) = \frac{1}{2\pi}$ – плотность вероятностей распределения фазы отраженных сигналов (равновероятно в диапазоне $0 \le \varphi \le 2\pi$).

С учетом этого отношение правдоподобия в общем виде может быть приведено к виду

$$\Lambda = \int_0^{2\pi}\int_0^{\infty}\prod_{k=1}^{M_{rec}}\prod_{i=1}^{M_{tr}}\prod_{l=1}^{L}\left[\frac{1}{N_{ok}} exp\left\{2Re\left[\dot{Y}_{ki}(t)\dot{S}^H_{ki}(t)\right]\right\} exp\left\{-\frac{2\dot{S}_{ki}(t)\dot{S}^H_{ki}(t)}{N_{ok}}\right\}\right] p(\xi)\, p(\varphi)\, d\varphi d\xi =$$

$$= \int_0^{2\pi}\int_0^{\infty}\prod_{k=1}^{M_{rec}}\prod_{i=1}^{M_{tr}}\prod_{l=1}^{L}\left[\frac{1}{N_{ok}} exp\left\{2\left|\dot{Y}_{ki}(t)\dot{S}^H_{ki}(t)\right|\cos(\varphi)\right\} \times exp\left\{-\frac{2\dot{S}_{ki}(t)\dot{S}^H_{ki}(t)}{N_{ok}}\right\}\right] p(\xi)\, p(\varphi)\, d\varphi d\xi.$$

Рассмотрим различные варианты флуктуаций эхо-сигналов в соответствии с моделями Сверлинга1-4 [10] и соответствующие им варианты обработки эхо-сигналов БЛА.

В случае, когда флуктуации эхо-сигналов БЛА в пачке дружные (коррелированные от импульса к импульсу), соответствующие плотности вероятностей распределения амплитуды и фазы эхо-сигналов могут быть записаны в виде:

$$p(\varphi) = p(\varphi_o) = \int_0^{2\pi} p(\varphi)\,\delta(\varphi - \varphi_o)\, d\varphi.$$

В этом случае отношение правдоподобия может быть приведено к виду:

$$\Lambda = \prod_{k=1}^{M_{rec}}\prod_{i=1}^{M_{tr}}\prod_{l=1}^{L}\left[\frac{1}{N_{ok}} exp\left\{2\xi_o\left|\dot{Y}_{ki}(t)\dot{S}^H_{ok\,i}(t)\right|\cos(\varphi - \varphi_o)\right\} exp\left\{-\frac{2\xi_o^2\dot{S}_{oki}(t)\dot{S}^H_{oki}(t)}{N_{ok}}\right\}\right],$$

а логарифм отношения правдоподобия соответственно может быть представлен в виде:

$$ln\Lambda = \sum_{k=1}^{M_{rec}}\sum_{i=1}^{M_{tr}}\sum_{l=1}^{L}\left[\frac{2\xi_o\left|\dot{Y}_{ki}(t)\dot{\boldsymbol{S}}^H_{ok\,i}(t)\right|\cos(\varphi - \varphi_o)}{N_{ok}} - \frac{2\xi_o^2\dot{S}_{oki}(t)\dot{S}^H_{oki}(t)}{N_{ok}}\right]. \quad (9)$$

Подставляя в (9) выражение для модели сигнала с бинарной кодовой фазовой модуляцией, получаем выражение, определяющее алгоритм обработки данного типа сигнала:

$$ln\Lambda = \sum_{k=1}^{M_{rec}}\sum_{i=1}^{M_{tr}}\sum_{l=1}^{L}\left[\frac{\xi_{o\,ki}\sqrt{P_i}\,\propto_{k\,i}}{N_{ok}}\left|\dot{\rho}_{k\,ii}(\tau_{k\,i} - lT_p, F_{D\,ki})\right| - \frac{2\xi_o^2 E_{co\,ki}}{N_{o\,k}}\right],$$

где $\dot{\rho}_{k\,ii}(\tau_{k\,i} - lT_p, F_{D\,ki})$ – корреляционный ин-

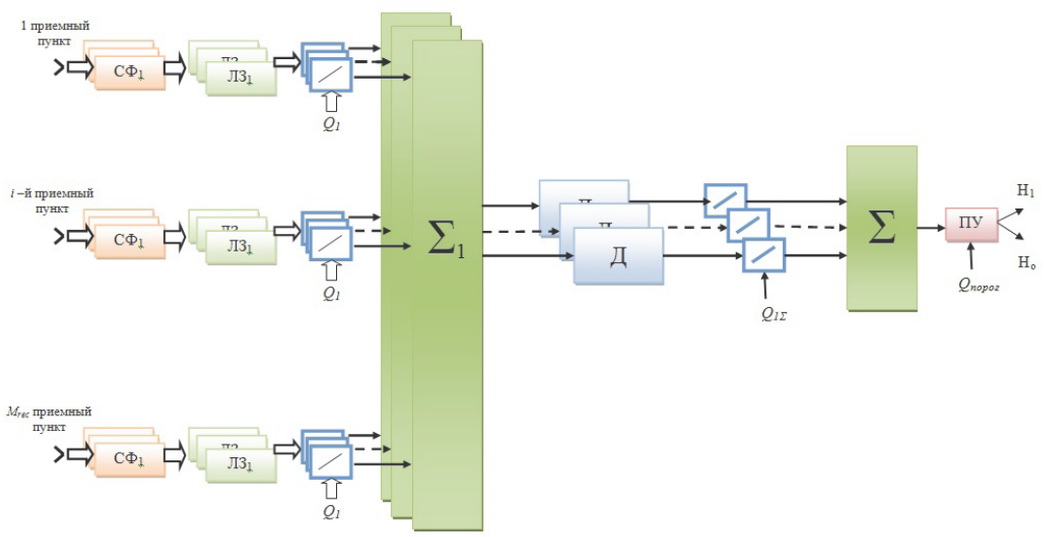



**Рис. 2.** Структурная схема централизованной обработки ортогонально модулированных эхо-сигналов БПЛА в пространственно когерентной многопозиционной системе

теграл для $k$-го приемника и $i$-го сигнала передатчика с учетом времени запаздывания, периода посылок и частоты Доплера сигнала;

$E_{co\,ki}$ – энергия $i$-го сигнала на входе $k$-го приемника для случая отсутствия флуктуаций сигнала.

Таким образом, при дружных флуктуациях эхо-сигналов БЛА в пространственно некогерентной многопозиционной системе обнаружения весовому суммированию подвергаются модульные значения корреляционного интеграла для каждого сигнала передатчика (результат последетекторной обработки) с учетом выравнивания задержек сигналов от различных передатчиков и нормировки по уровню шума на различных позициях. Структура алгоритма обработки сигнала приведена на *рисунке 3*.

В случае независимых флуктуаций эхо-сигналов БЛА будем полагать, что фаза сигналов распределены по равновероятному закону, а распределение амплитуд $p(\xi)$ – соответствует моделям Сверлинга – (7) или (8). В случае модели флуктуаций соответствующей Сверлингу-2 усредняя отношение правдоподобия по случайному параметру $\varphi$ получаем:

$$\Lambda = \int_0^{\infty} \prod_{k=1}^{M_{rec}} \prod_{i=1}^{M_{tr}} \prod_{l=1}^{L} \left[ \frac{1}{N_{ok}} I_o\left( \frac{2\xi \left| \dot{Y}_{ki}(t)\dot{S}^H_{ki}(t) \right|}{N_o} \right) exp\left\{ -\frac{2\xi^2 \dot{S}_{ki}(t)\dot{S}^H_{ki}(t)}{N_{ok}} \right\} \right] p(\xi)\, d\xi.$$

Усредняя по случайной амплитуде $\xi$ получаем:

$$\Lambda = \int_0^{\infty} \prod_{k=1}^{M_{rec}} \prod_{i=1}^{M_{tr}} \prod_{l=1}^{L} \left[ I_o\left( \frac{2\xi \left| \dot{Y}_{ki}(t)\dot{S}^H_{ki}(t) \right|}{N_o} \right) exp\left\{ -\frac{2\xi^2 \dot{S}_{ki}(t)\dot{S}^H_{ki}(t)}{N_{ok}} \right\} \right] \frac{2\xi}{\bar{\sigma}} exp\left\{ -\frac{\xi^2}{\bar{\sigma}} \right\} d\xi =$$

$$= \int_0^{\infty} \prod_{k=1}^{M_{rec}} \prod_{i=1}^{M_{tr}} \prod_{l=1}^{L} \left[ \frac{1}{N_{ok}} I_o\left( \frac{2\xi \left| \dot{Y}_{ki}(t)\dot{S}^H_{k\,i}(t-lT_p) \right|}{N_o} \right) \times \right.$$

$$\left. \times exp\left\{ -\frac{2\xi^2 \dot{S}_{ki}(t-lT_p)\dot{S}^H_{ki}(t-lT_p)}{N_{o\,k}} \right\} \right] \frac{2\xi}{\bar{\sigma}} exp\left\{ -\frac{\xi^2}{\bar{\sigma}} \right\} d\xi$$

Используя табличный интеграл вида [11]

$$\int_0^{\infty} x I_o(\mu x) e^{-\nu x^2} dx = \frac{1}{2\nu} e^{\frac{\mu^2}{4\nu}},$$

получаем выражение для отношения правдоподобия

$$\Lambda = \prod_{k=1}^{M_{rec}} \prod_{i=1}^{M_{tr}} \prod_{l=1}^{L} \left[ \frac{2N_{ok}}{\bar{\sigma}E_{ki} + N_{ok}} exp\left\{ -\frac{\bar{\sigma} \left| \dot{Y}_{ki}(t)\dot{S}^H_{ki}(t-lT_p) \right|^2}{N_{o\,k}(2\bar{\sigma}E_{ki} + N_{ok})} \right\} \right]. \quad (10)$$

Величину $\bar{\sigma}$ определяют из соотношения для средней энергии сигнала с учетом табличного интеграл вида:

$$\int_0^{\infty} x^3 e^{-\nu x^2} dx = \frac{1}{2\nu^2}.$$

$$E_{s\,cp} = \bar{\sigma}^2 E_{so} = \int_0^{\infty} E(\xi)\, p(\xi)\, d\xi = \int_0^{\infty} \xi^2 E_o \frac{2\xi}{\bar{\sigma}} exp\left\{ -\frac{\xi^2}{\bar{\sigma}} \right\} d\xi = E_{so}.$$

Из полученного соотношения получаем, что $\bar{\sigma} = 1$.

С учетом этого окончательное выражение для отношения правдоподобия имеет вид:

$$\Lambda = \prod_{k=1}^{M_{rec}} \prod_{i=1}^{M_{tr}} \prod_{l=1}^{L} \left[ \frac{2N_{ok}}{E_{ki} + N_{ok}} exp\left\{ -\frac{\left| \dot{Y}_{ki}(t)\dot{S}^H_{ki}(t-lT_p) \right|^2}{N_{o\,k}(2E_{ki} + N_{ok})} \right\} \right]. \quad (11)$$

Логарифм отношения правдоподобия с учетом принятой модели сигнала с бинарной фазовой модуляцией (1) имеет вид

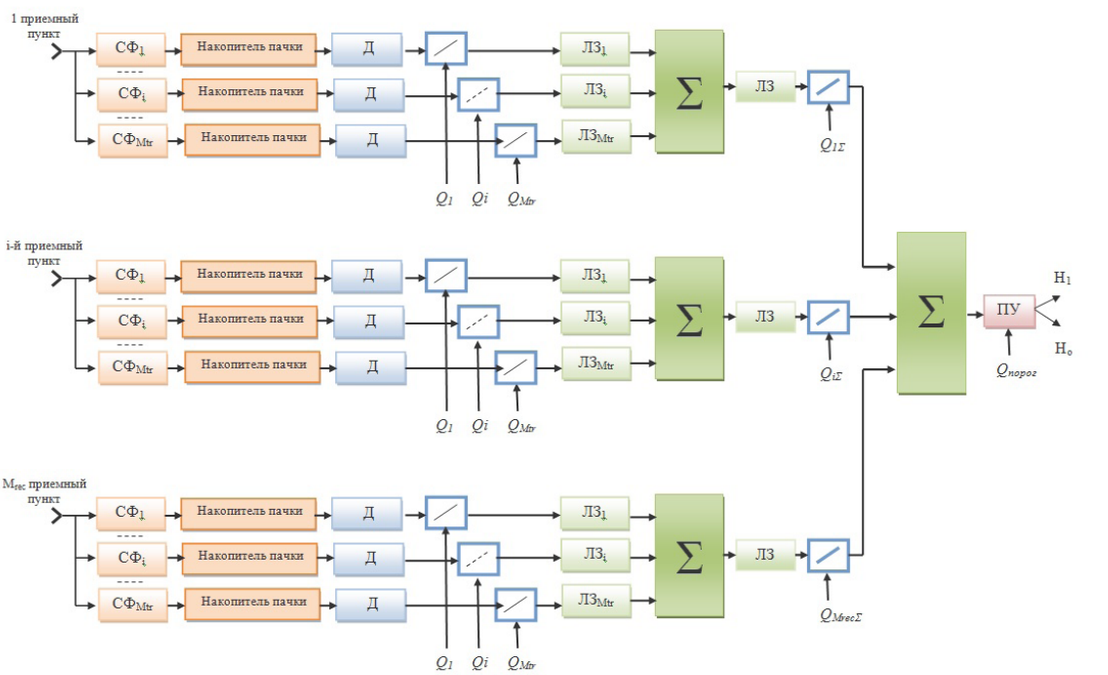



**Рис. 3.** Обобщенная структурная схема обработки сигналов в пространственно-некогерентной системе при дружных флуктуациях сигналов

$$ln\Lambda = \sum_{k=1}^{M_{rec}}\sum_{i=1}^{M_{tr}}\sum_{l=0}^{L-1}\left[\frac{exp\{-j\varphi_{ki}\}\sqrt{P_i}\,\alpha_{ki}}{N_{ok}}\left|\dot{\rho}_{k\,ii}\left(\tau_{k\,i}-lT_p,F_{D\,ki}\right)\right|^2+ln\left(\frac{2N_{ok}}{E_{ki}+N_{ok}}\right)\right]. \quad (12)$$

Как следует из (12) в случае независимых флуктуаций эхо-сигналов БЛА, соответствующих модели Сверлинга-2, в пространственно некогерентной системе обнаружения при централизованной обработке весовому суммированию подвергаются квадраты модульного значения корреляционного интеграла для каждого сигнала передатчика (после квадратичного детектирования сигналов).

Для модели флуктуаций сигнала, соответствующей Сверлингу-4 усреднение отношения правдоподобия по случайной амплитуде $\xi$ производится с использованием плотности распределения вероятностей (8):

$$\Lambda=\prod_{k=1}^{M_{rec}}\prod_{i=1}^{M_{tr}}\prod_{l=1}^{L}\left[\int_0^{\infty}\left[I_o\left(\frac{2\xi\left|\dot{Y}_{ki}(t)\dot{S}_{ki}^{H}\left(t-(l-1)T_p\right)\right|}{N_{ok}}\right)\times exp\left\{-\frac{2\xi^2\dot{S}_{ki}\left(t-(l-1)T_p\right)\dot{S}_{ki}^{H}\left(t-(l-1)T_p\right)}{N_{ok}}\right\}\right]\frac{8\xi^3}{\bar{\sigma}}exp\left\{-\frac{2\xi^2}{\bar{\sigma}}\right\}d\xi\right].$$

Интеграл может быть записан в виде

$$\int_0^{\infty}\frac{8\xi^3}{\bar{\sigma}}\left[I_o\left(\frac{2\xi\left|\dot{\rho}_{k\,ii}\left(t-(l-1)T_p\right)\right|}{N_{ok}}\right)exp\left\{\frac{2\xi^2E_{k\,ii}}{N_{ok}}\right\}exp\left\{-\frac{2\xi^2}{\bar{\sigma}}\right\}\right]d\xi=\frac{1}{\bar{\sigma}}\int_0^{\infty}8\xi^3\left[I_o\left(\frac{2\xi\left|\dot{\rho}_{k\,ii}\left(t-(l-1)T_p\right)\right|}{N_{ok}}\right)exp\left\{\frac{2\xi^2E_{k\,ii}}{N_{ok}}\right\}exp\left\{-\frac{2\xi^2}{\bar{\sigma}}\right\}\right]d\xi,$$

$$\dot{\rho}_{k\,ii}\left(t-(l-1)T_p\right)=\dot{Y}_{ki}(t)\dot{S}_{k\,i}^{H}\left(t-(l-1)T_p\right),$$

$$E_{k\,ii}=\dot{S}_{ki}\left(t-(l-1)T_p\right)\dot{S}_{ki}^{H}\left(t-(l-1)T_p\right).$$

Интеграл такого типа при $m=2$ может быть приведен к виду [8]

$$\frac{2\times2^2}{\Gamma(2)}\int_0^{\infty}\xi^3I_o(\mu\xi)exp\left\{-\nu\xi^2\right\}=(-1)\frac{2\times2^2}{\Gamma(2)}\frac{d}{d\upsilon}\left[\frac{1}{2\nu}exp\left\{\frac{\mu^2}{4\nu}\right\}\right],$$

где

$$\mu=q\left|\rho\right|,$$

$$\nu=2+\frac{q^2}{2}.$$

Получаем выражение для отношения правдоподобия

$$\Lambda=\prod_{k=1}^{M_{rec}}\prod_{i=1}^{M_{tr}}\prod_{l=1}^{L}\left[exp\left\{\frac{1}{2}\frac{\left|\dot{\rho}_{k\,ii}\left(t-(l-1)T_p\right)\right|^2}{(E_{ki}+4N_{ok})}\right\}\left\{\frac{N_{o\,k}+2E\left|\dot{\rho}_{k\,ii}\left(t-(l-1)T_p\right)\right|^2}{2N_{o\,k}+E_{k\,i}}\right\}\right].$$

Соответственно логарифм отношения правдоподобия может быть записан в виде:

$$\Lambda=\prod_{k=1}^{M_{rec}}\prod_{i=1}^{M_{tr}}\prod_{l=1}^{L}\left[exp\left\{\frac{1}{2}\frac{\left|\dot{\rho}_{k\,ii}\left(t-(l-1)T_p\right)\right|^2}{(E_{ki}+4N_{ok})}\right\}\left\{\frac{N_{o\,k}+2E\left|\dot{\rho}_{k\,ii}\left(t-(l-1)T_p\right)\right|^2}{2N_{o\,k}+E_{k\,i}}\right\}\right].$$

Таким образом, при независимых флуктуациях эхо-сигналов БЛА, соответствующих модели Сверлинг-4, как и в случае модели флуктуаций Сверлинг-2, суммированию подвергаются квадраты модульного значения корреляционного интеграла для каждого сигнала передатчика. Различия состоят только в нормирующих множителях при весовом суммировании и величине порогового сигнала при обнаружении.

Обобщенная структурная схема алгоритма централизованной обработки сигналов в многопозиционной пространственно некогерентной многопозиционной системе обнаружения для случая независимых флуктуаций эхо-сигналов по моделям Сверлинг-2,4 представлена на *рисунке 4*.

## 2. Оценка эффективности разработанного алгоритма. Результаты математического моделирования

Показатели качества обнаружения сигналов

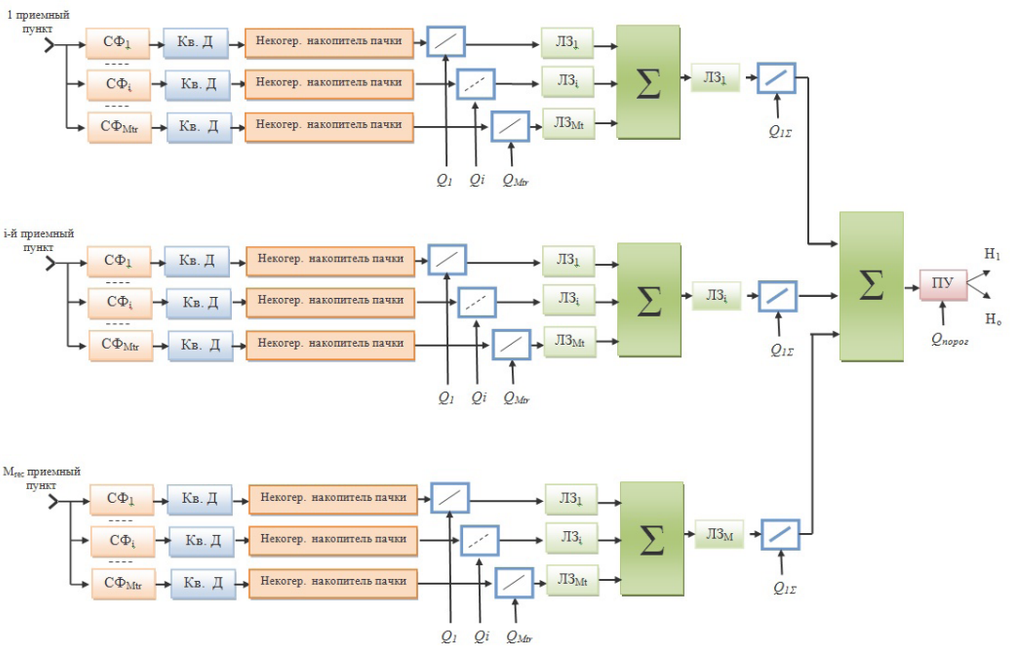



**Рис. 4.** Обобщенная структурная схема обработки сигналов в пространственно- некогерентной системе при независимых флуктуациях сигналов (Сверлинг-2,4)

в многопозиционных системах зависят от многих условий, в том числе от:

- количества передающих и приемных позиций;
- характера флуктуаций эхо-сигналов;
- размер пачки обрабатываемых сигналов;
- выполнения условий пространственной когерентности (не когерентности) сигналов;
- порядка сбора и обработки сигналов приемных позиций – централизованного или децентрализованного.

Методом математического моделирования с использованием статистических характеристик флуктуаций эхо-сигналов были рассчитаны характеристики обнаружения для многопозиционной системы обнаружения при использовании централизованной и децентрализованной обработки для различных моделей флуктуаций амплитуд сигналов от БПЛА (модель флуктуаций Сверлинг-1 – Сверлинг-4), количества передающих и приемных пунктов, количества импульсов, накапливаемых на каждой приемной позиции.

Для пространственно когерентной многопозиционной системы и централизованной об-

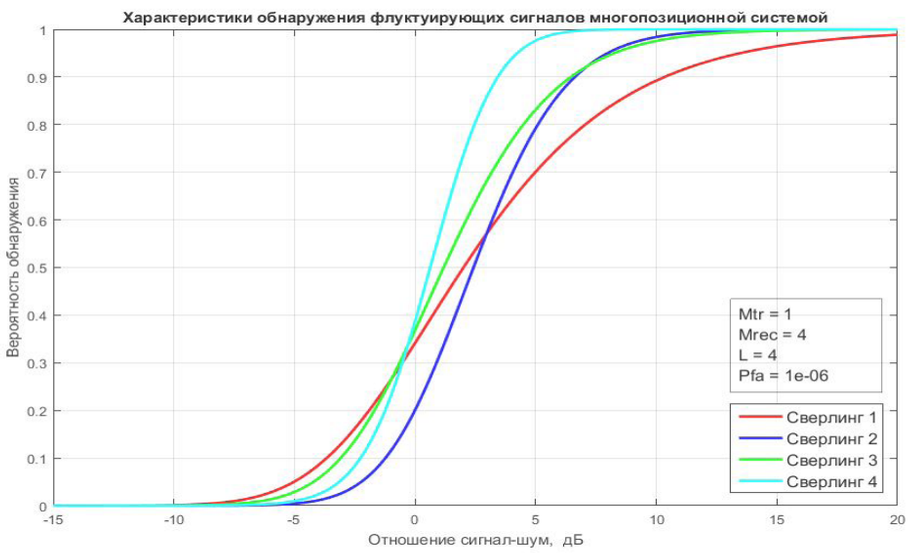



**Рис. 5.** Характеристики обнаружения пакета из 4-х флуктуирующих импульсов БПЛА (Сверлинг-1 – Сверлинг-4) пространственно когерентной многопозиционной системой, состоящей из 1-ой передающей и 4-х приемных позиций

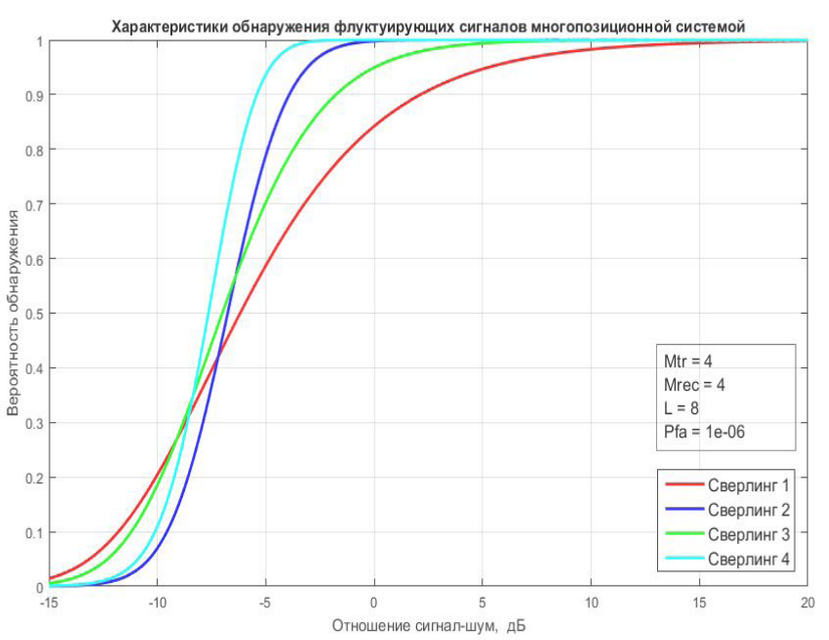



**Рис. 6.** Характеристики обнаружения пакета из 8-ми флуктуирующих импульсов БПЛА (Сверлинг-1 – Сверлинг-4) пространственно когерентной многопозиционной системой, состоящей из 4-х передающих и 4-х приемных позиций

работки сигналов характеристики обнаружения флуктуирующих сигналов БПЛА в зависимости от количества передающих $M_{tr}$ и приемных позиций $M_{rec}$, количества накапливаемых импульсов $L$, приведены на *рисунках 5-6*. При расчетах принято допущение, что уровень принимаемого сигнала на всех приемных позициях одинаков (одинаковые условия обнаружения сигналов на приемных позициях), а вероятность ложной тревоги составляет $P_{fa}=10^{-6}$.

Аналогичные расчеты характеристик обнаружения флуктуирующих сигналов БПЛА были проведены при условии пространственной не когерентности многопозиционной системы. Соответствующие характеристики обнаружения приведены на *рисунках 7-8*.

**Выводы**

Разработанный алгоритм централизованной обработки сигналов в многопозиционной РЛС обнаружения БЛА является эффективным. Результаты математического моделирования показывают, что при прочих равных условиях пространственно когерентная система имеет выигрыш в вероятности обнаружения флуктуирующих сигналов БЛА за счет более эффективного

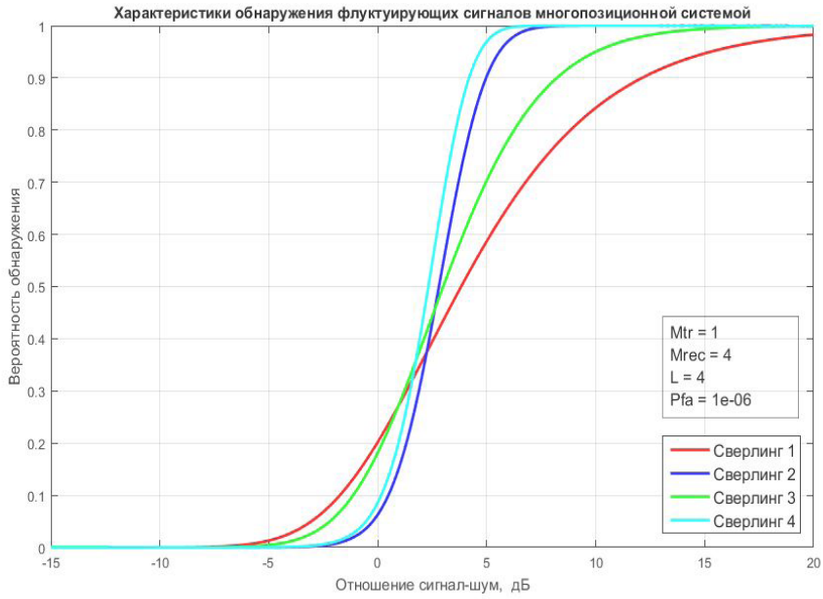



**Рис. 7.** Характеристики обнаружения пакета из 4-х флуктуирующих импульсов БПЛА (Сверлинг 1 – Сверлинг 4) пространственно не когерентной многопозиционной системой, состоящей из 1-го передающего и 4-х приемных позиций

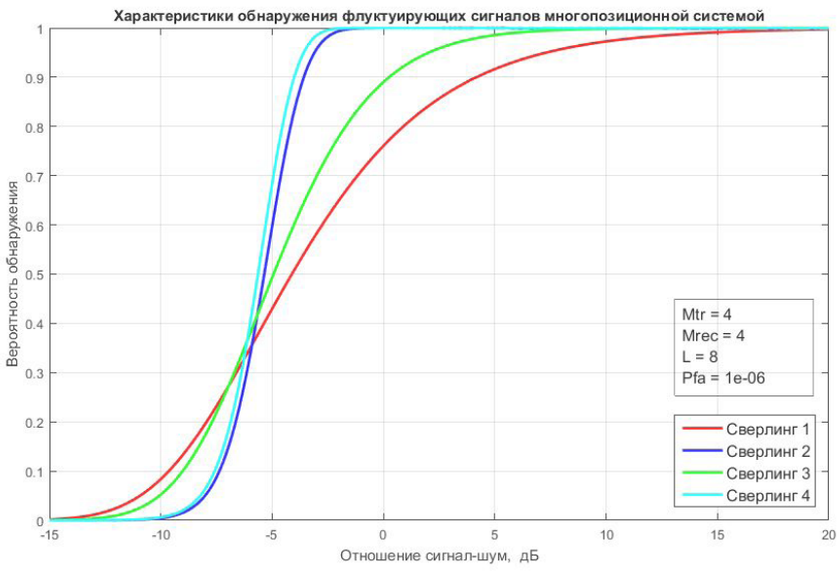
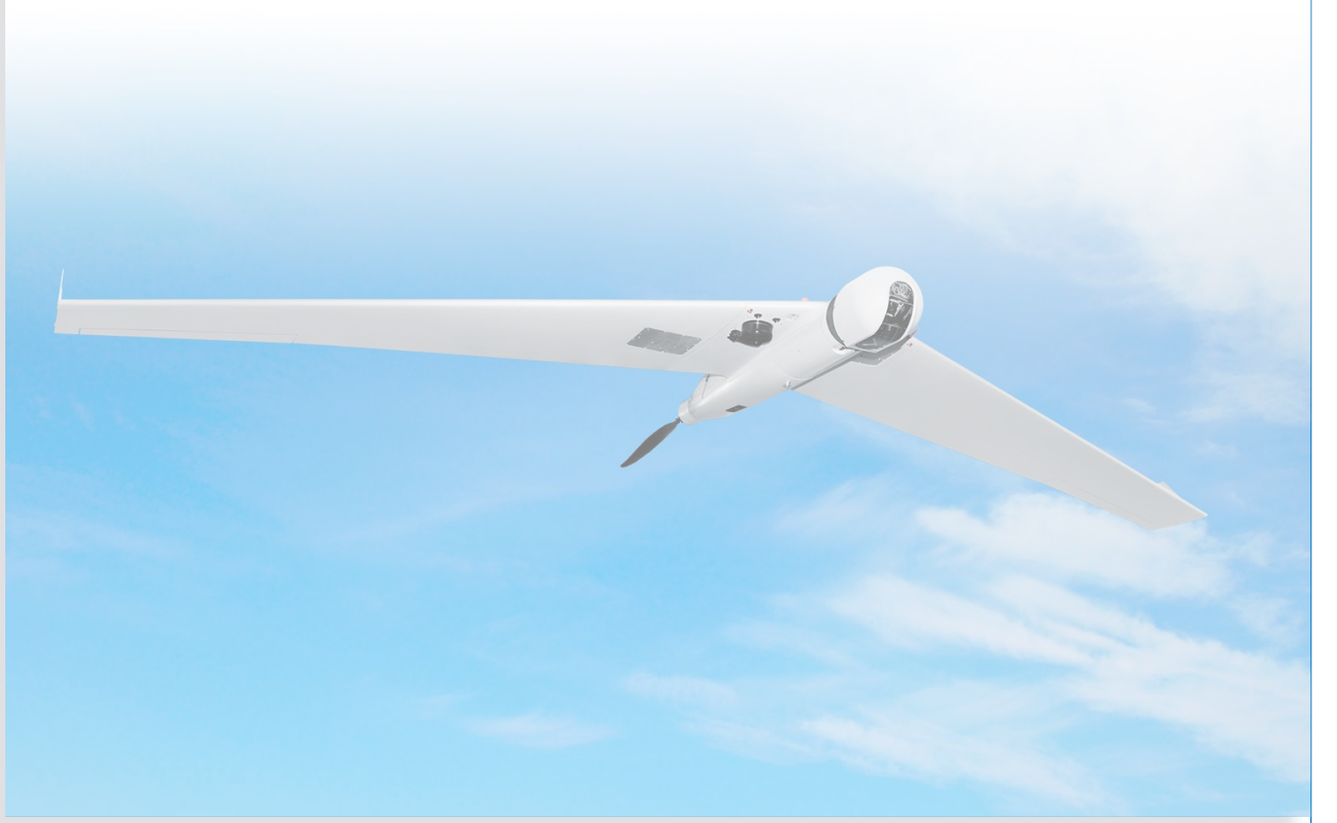



**Рис. 8.** Характеристики обнаружения пакета из 8-ми флуктуирующих импульсов БПЛА (Сверлинг-1 – Сверлинг-4) пространственно не когерентной многопозиционной системой, состоящей из 4-х передающих и 4-х приемных позиций

когерентного накопления сигнала. Однако условия для пространственно когерентной обработки сигналов в большинстве реальных ситуаций обнаружения БЛА не выполняются. Поэтому централизованная обработка сигналов БЛА на практике осуществляется с учетом пространственной не когерентности эхо-сигналов.

**Литература**

1. Промыслов В.Г., Семенков К.В., Жарко Е.Ф. Методы оценки информационной угрозы для беспилотных транспортных средств в среде «умного города» // Проблемы управления, 2020. № 3. С.49-58.
2. Ерохина О.В. Перспективы создания «умных городов» в России // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2018. Т.12. №4. С.17-22.
3. Юрьева Р.А., Комаров И.И., Масленников О.С. Разработка метода обнаружения и идентификации скрытого деструктивного воздействия на мультиагентные робототехнические системы // Программные системы и вычислительные методы, 2016. №4. С.375-382.
4. The Concept of a Multi-Beam Radar in the Smart City Air Traffic Control System / A.A. Lavrov, I.K. Antonov, V.G. Ovchinnikov, A.V. Nikonenko, D.S. Chirov // 2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, 2021. Pp.1-7.
5. Chirov D.S., Kochetkov Y.A. Assessment of the Accuracy of Determining the Coordinates and Speed of Small-Size UAV of a Multi-Position Radar with Omnidirectional Antenna Elements // 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, 2020. Pp.1-6.
6. Zima D.N., Sokolova D.O., Spector A.A. Prostranstvenno-vremennaya obrabotka shirokopolosnykh signalov na osnove modeli lineinogo predskazaniya [Spatiotemporal processing of broadband signals based on the linear prediction model] // Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences, 2020. №4(49). Pp.17-31.
7. Deep-learning based noise-resistant broadband signal recovery for fiber-connected radar networks / Y.Zhou, F.Zhang, G.Sun, B.Gao, S.Pan // 2021 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS), 2021. Pp.1-3.
8. Kohler M.A Multifunctional Broadband Receiver for Bistatic X-Band Radar Measurements / 2020 IEEE International Radar Conference (RADAR), 2020. Pp.918-922.
9. Черняк В.С. О новом направлении в радиолокации: MIMO РЛС / Прикладная радиоэлектроника, 2009. Т.8. №4. С.477-489.
10. Минаков Е.И., Валихин Г.А. Вероятность радиолокационного обнаружения флуктуирующих целей // Известия ТулГУ. Технические науки, 2016. Вып.12. Ч.2. С.159-163.
11. Ширман Я.Д., Манжонс В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М.: Радио и связь, 1981. 416 с.



УДК 621.376, 621.397.335

# АЛГОРИТМ ФАЗИРОВАНИЯ ПРИ ДЕМОДУЛЯЦИИ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ И СИГНАЛОВ С КВАДРАТУРНОЙ АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

# PHASING ALGORITHM FOR DEMODULATION OF PHASE-KEYED SIGNALS AND SIGNALS WITH QUADRATIVE AMPLITUDE MODULATION

Константин Юрьевич Рюмшин
*доктор технических наук*
ведущий научный сотрудник
ФГБОУ ВО «МТУСИ»
Адрес: 111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а
Тел.: +7(499)184-19-03
E-mail: e8@mail.ru

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

Андрей Алексеевич Амелёнков
*кандидат экономических наук, доцент*
начальник исследовательской части
ФГБОУ ВО «МТУСИ»
Адрес: 111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а
Тел.: +7 (499) 184-19-03
E-mail: amelioncov@linguanet.ru

Алексей Павлович Журавлёв
начальник лаборатории
ФГБОУ ВО «МТУСИ»
Адрес: 111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а
Тел.: +7 (499) 184-19-03
E-mail: arpal@yandex.ru

**Аннотация**

В статье представлен новый алгоритм восстановления тактовой синхронизации, реализованный на базе адаптивного корректора. Проведенное исследование относится к направлению разработки приемных устройств систем связи, использующих в своих каналах модуляцию ФМ/КАМ сигналов. Полученные результаты могут быть использованы при разработке схем демодуляции спутниковых, радиорелейных и оптических систем связи. Разработанный алгоритм адаптивного восстановления тактовой синхронизации (АВТС), как модификация адаптивного корректора, представлен в схеме обработки непрерывных сигналов для варианта «слепой» коррекции. Однако, данный алгоритм может быть эффективно использован также в схемах демодуляции блочно-непрерывных сигналов с подстройкой коэффициентов корректора по уникальному слову и пилот-символам. Разработанный алгоритм, в сравнении с классическими схемами тактовой синхронизации, имеет более низкую вычислительную сложность и эффективно работает с частотой дискретизации входного сигнала, соответствующей 2 отсчетам на символ модуляции без снижения помехоустойчивости. На базе представленного алгоритма возможна разработка схем демодуляции, работающих на скорости входного сигнала 1,5 или 1 отсчет на символ модуляции.

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

**Summary**

The article presents a new clock recovery algorithm implemented on the basis of an adaptive corrector. The conducted research relates to the direction of development of receivers of communication systems using FM/QAM signal modulation in their channels. The results obtained can be used in the development of demodulation schemes for satellite, radio relay and optical communication systems. The developed algorithm for adaptive clock synchronization recovery (ATC), as a modification of the adaptive corrector, is presented in the continuous signal processing circuit for the «blind» correction option. However, this algorithm can also be effectively used in demodulation schemes for block-continuous signals with adjustment of the equalizer coefficients by the unique word and pilot symbols. The developed algorithm, in comparison with classical clock synchronization schemes, has a lower computational complexity and works effectively with an input signal sampling rate corresponding to 2 samples per modulation symbol without reducing noise immunity. Based on the presented algorithm, it is possible to develop demodulation schemes operating at an input signal rate of 1,5 or 1 sample per modulation symbol.

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

## Введение

Для современных высокоскоростных широкополосных систем связи большое значение имеет проблема минимизации стоимости приемного оборудования как на стороне абонента, так и на стороне базовой станции. Ее величина включает стоимость реализации приемного аналогового тракта, стоимость АЦП и стоимость реализации алгоритмов радиоинтерфейса – демодулятора, помехоустойчивого декодера и т.д. Сложность реализации и, соответственно, стоимость данных элементов приемного оборудования напрямую зависят от ширины частотной полосы входного сигнала, с которой работает приемный тракт и демодулятор.

Современные алгоритмы демодуляции КАМ/ФМ сигналов работают в частотной полосе в 2-4 раза большей тактовой скорости модулированного сигнала (2-4 отсчета цифрового сигнала с выхода АЦП на символ модуляции). Данная статья посвящена разработке алгоритмов демодуляции, работающих с полосой входного сигнала, соответствующей двум и менее отсчетам на символ, без потери помехоустойчивости и качества работы приемного устройства системы связи. Предлагаемые алгоритмы демодуляции представлены в варианте «слепой» коррекции для обработки непрерывного КАМ сигнала. Однако также могут применяться в схемах демодуляции блочно-непрерывных КАМ сигналов с подстройкой корректора по уникальному слову и пилот-символам.

Современные схемы демодуляции непрерывных КАМ сигналов включают такие элементы как:

- автоматическую регулировку усиления (АРУ);
- систему восстановления тактовой синхронизации (ВТС);
- фазовую автоподстройку частоты (ФАПЧ);
- адаптивный корректор межсимвольных/канальных искажений;
- детектор (схема принятия решения).

Реализация алгоритмов демодуляции схема тактовой синхронизации является одним из самых ресурсоемких вычислительных элементов. Адаптивный корректор, перестраиваемый методом минимизации среднеквадратичной ошибки по информационному сигналу, способен (независимо от восстановления тактовой синхронизации) отслеживать расстройку тактовой синхронизации в пределах длины линии задержки корректора.

## Проблемные аспекты демодуляции сигналов КАМ

На *рисунке 1* представлена квадратурная схема демодуляции непрерывных КАМ сигналов с классической схемой ВТС [1], построенной на базе полосовых фильтров. Сплошными стрелками показаны этапы преобразования сигнала в процессе обработки (x1, x2, ...), а пунктирными – оценки различных параметров сигнала (тактовая частота, среднеквадратичная ошибка детектирования). Модуль восстановления тактовой синхронизации обеспечивает соответствие моментов принятия решения детектором максимуму энергетики передаваемых символов.

Текущее состояние комплексных коэффициентов корректора задается вектором

$$C = \{c_0, c_1, \ldots, c_{k-1}\}.$$

Алгоритм адаптации в векторном виде определяется следующим образом [2]:

$$C_{k+\tau} = C_k - \delta \varepsilon_k X^*_{3k}, \qquad (1)$$

где $C_k$ и $C_{k+\tau}$ – соответственно старый и новый вектора коэффициентов;

$\tau$ – интервал символа модуляции;

$\varepsilon_k$ – сигнал ошибки основанный на среднеквадратичной оценке детектора по информационному сигналу или пилот-сигналу;

$X^*_{3k}$ – комплексное сопряжение вектора входного сигнала;

$\delta$ – коэффициент скорости адаптации (выбирается достаточно малым, чтобы обеспечить сходимость корректора).

Система восстановления тактов весьма эффективно справляется с задачей – определение

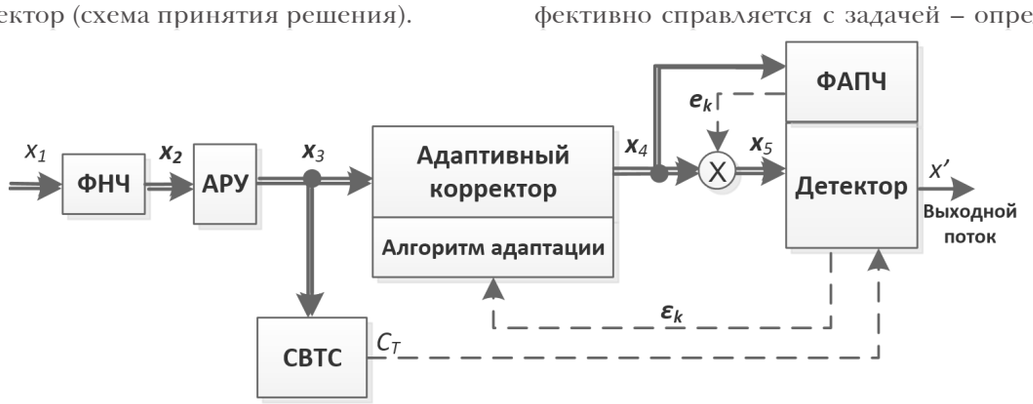



**Рис. 1.** Демодулятор непрерывных КАМ сигналов с СВТС

тактовых моментов работы детектора символов с «отслеживанием» расстройки тактовой частоты. В процессе осуществления моделирования схемы обработки сигналов, представленной на рисунке 1, установлено, что ВТС использует около 15% вычислительного ресурса, требуемого на работу схемы демодуляции в целом.

Настройку коэффициентов корректора по информационному сигналу в некоторых источниках называют «слепой» коррекцией [1]. При этом для получения сигнала ошибки используется оценка переданного символа

$$\varepsilon_k = x'_k - x_{5k}, \qquad (2)$$

где $x'_k$ – решение детектора, вычисляемое по выходному сигналу корректора после подстройки ошибки фазы несущей [3] $x_{5k}$ взятой в тактовые моменты.

На начальном этапе настройки коэффициентов может использоваться предварительная коррекция с проведением оценки передаваемого символа относительно упрощенной схемы СКК. В рамках итерационного алгоритма осуществляется вычисление вектора оптимальных коэффициентов $C_{opt}$, с целью предварительной коррекции – приближение точки поверхности рабочей функции, соответствующей текущему выбору коэффициентов, к оптимальной величине. При переходе на основной вариант коррекции рабочая функция должна быть достаточно близка к оптимальной, чтобы дальнейший процесс адаптации по реальной СКК привел к сходимости коэффициентов до оптимального значения [4].

Комплексный сигнал с выхода адаптивного корректора записывается в виде суммы произведений комплексных величин:

$$\mathbf{x}_4(kT) = \sum_{j=0}^{K-1} \mathbf{c}_j \cdot \mathbf{x}_3((k+j)T) \qquad (3)$$

Адаптивный корректор, независимо от ВТС, способен «отслеживать» расстройку тактовой синхронизации в пределах длины корректора ($K$) с условием достаточной скорости адаптации – коэффициент скорости адаптации $\delta$. Основным искажением, ухудшающих качество демодуляции, в процессе применения корректора для компенсации расстройки тактовой частоты является увеличение дисперсии точек СКК вследствие ограниченности длинны корректора, т.е. конечности его импульсной характеристики [5]. В процессе «отслеживания» расстройки тактов при смещении основного лепестка импульсной характеристики порядка половины длинны корректора $K/2$ «граничный» эффект начинает превалировать в процессе адаптации коэффициентов, и сходимость корректора нарушается.

### Алгоритм адаптивного восстановления тактовой синхронизации

Для обеспечения возможности восстановления тактовой синхронизации на базе адаптивного корректора были разработан алгоритм адаптивного восстановления тактовой синхронизации (АВТС), включающий:

- алгоритм выравнивания («центрирования») коэффициентов для компенсации смещения основного лепестка импульсной характеристики корректора;
- алгоритм реверсивной подстройки коэффициентов для устранения искажений, вызываемых ограниченностью длинны регистров адаптивного корректора.

Схема адаптивного корректора с восстановлением тактовой синхронизации показана на *рисунке 2*.

Алгоритм «центрирования» коэффициентов отслеживает позицию $M$ основного лепестка импульсной характеристики корректора. «Вес» коэффициентов корректора определяется как выход корректора (3) при использовании в качестве входного сигнала координаты точек эталона СКК $\boldsymbol{x}_3(kT)=\boldsymbol{d}_{СКК}$. «Вес» коэффициентов корректора равен

$$\Lambda = \sum_{j=0}^{K-1} \boldsymbol{c}_j \cdot \boldsymbol{d}_{СКК} . \qquad (4)$$

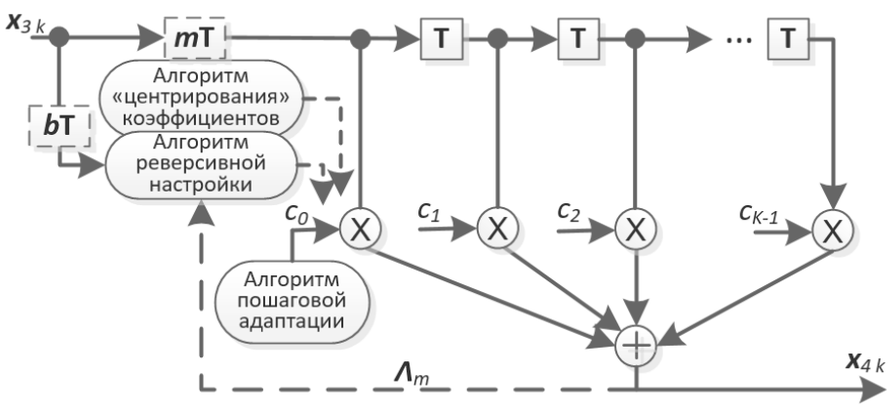



**Рис. 2.** Схема адаптивного корректора с восстановлением тактовой синхронизации

Весовой центр $M$ (равен $K/2$ в начале обработки) коэффициентов корректора будет соответствовать половине $\Lambda$.

$$\Lambda_M = \sum_{j=0}^{M} d_{СКК} \cdot c_j = \frac{\Lambda}{2} \quad (5)$$

Текущее смещение расстройки тактов будет равно $m=M–K/2$ отсчетов.

Алгоритм компенсации расстройки тактов в адаптивном корректоре реализуется посредством сдвига коэффициентов корректора и задержки (или смещения – в зависимости от знака расстройки) входного сигнала $\boldsymbol{x}_3(kT)$ на величину расстройки $m$.

Смещение коэффициентов корректора

$$\boldsymbol{c}_j = \boldsymbol{c}_{j\pm m},\ j = 0...K\text{-}1 \quad (6)$$

вызывает обнуление $m$ крайних коэффициентов.

Ограниченность длины регистров корректора при смещении и обнулении части коэффициентов вызывает «граничный» эффект в виде паразитной дисперсии точек СКК, величина которой пропорциональна величине сдвига. Для исключения данного эффекта после смещения коэффициентов выполняется подстройка корректора по реверсивному алгоритму на достаточно длинном буфере входного сигнала. Реверсивный алгоритм настройки коэффициентов корректора отличается от (1) тем, что вектор входного сигнала $\boldsymbol{X}_{3k}$ в пределах длинны $b$ выбранного буфера настройки выбирается реверсивно (от последнего отсчета к первому), что позволяет к завершению настройки исключить тактовый и фазовый разрыв выходного сигнала.

Необходимо также учитывать, что при существенных значениях расстройки несущей частоты в реверсивном алгоритме настройки коэффициентов корректора должен также применяться реверсивный алгоритм ФАПЧ.

### Оценка эффективности разработанного алгоритма. Результаты математического моделирования

В ходе проведения моделирования была реализована схема адаптивного корректора, показанная на *рисунке 2*. В результате схема демодуляции непрерывных амплитудно-фазоманипулированных сигналов была модифицирована как показано на *рисунке 3*.

Для оценки качества работы разработанного алгоритма АВТС было осуществлена моделирование алгоритмов демодуляции схем *рисунке 1* и *3* при расстройке $10^{-4}$ от тактовой скорости. Такое значение расстройки тактовой скорости является наиболее худшим вариантом нестабильности опорных генераторов приемо-передающих устройств и в реальных устройствах практически никогда не встречается. Модуль СВТС в схеме *рисунке 1* был реализован на базе одного из классических алгоритмов тактовой синхронизации [6,7]. Было проведено моделирование демодуляции сигналов ФМ-2, ФМ-4, ФМ-8, КАМ-16 для вариантов демодулятора ВТС и АВТС. В ходе проведения сравнительного моделирования процессов демодуляции схем, представленных на *рисунке 1* и *3*, не было выявлено значительного снижения качества демодуляции. Результаты моделирования в виде зависимостей отношения сигнал/шум на бит (ОСШ) от вероятности ошибки на бит в логарифмическом масштабе показаны на *рисунке 4*. Также показан график идеальной теоретической кривой помехоустойчивости для данных видов модуляции, который построен с помощью средств Matlab «Bit Error Rate Analysis» [8].

### Выводы

Специфика разработанного алгоритма АВТС является то, что частота его включения выбирается исходя из потенциальных значений тактовой расстройки, которые зависят от нестабильности АЦП/ЦАП системы связи. Включение алгоритма с частотой, соответствующей времени тактовой расстройки на один отсчет, при расстройке $10^{-6}$ тактовой скорости и 2 отсчетам на символ соответствует шагу около $5x10^5$ отсчетов. Для снижения вычислительной нагрузки алгоритма АВТС необходимо увеличить шаг его включения – сделать его соответствующим тактовой расстройки более длины символа (напри-

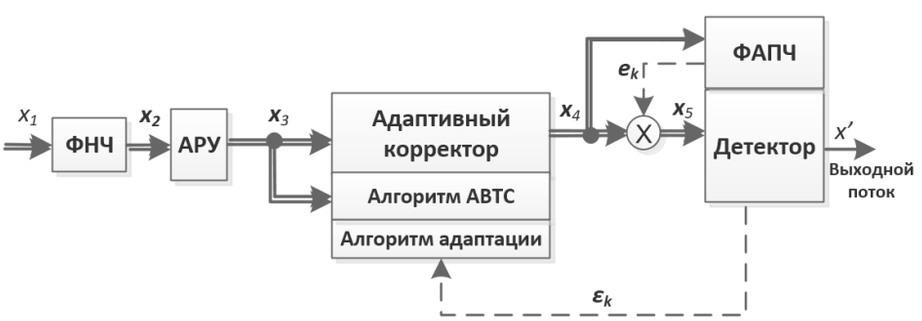



**Рис. 3.** Демодулятор КАМ сигналов с АВТС

мер, два символа). При этом, чтобы избежать «граничного» эффекта, необходимо иметь адаптивный корректор достаточной длинны – не менее 4 шагов включения АВТС.

Алгоритм АВТС как модификация алгоритма адаптивного корректора представлен для варианта «слепой» коррекции. Однако, данный алгоритм может быть использован также в схемах демодуляции блочно-непрерывных сигналов с подстройкой коэффициентов корректора по уникальному слову и полот-символам. Применение разработанного алгоритма в приемниках терминалов систем спутниковой связи возможно при добавлении в схему демодуляции модулей начальной синхронизации с корреляционным обнаружением уникального слова, как это показано в [9]. Применение алгоритма в приемниках оптических систем связи возможно при решении задач компенсации хроматической дисперсии как это показано в [10].

Разработанная система тактовой синхронизации на базе адаптивного корректора позволяет убрать из исходной схемы демодуляции модуль ВТС и уменьшить вычислительную сложность алгоритмов демодуляции в целом. В ходе моделирования работы схем *рисунке 1* и *3* было определено, что вычислительная сложность реализованной схемы демодуляции с АВТС была снижена на 10-15 % в зависимости от выбранного шага включения алгоритма.

**Литература**


1. Benedetto S., Biglieri. E. Principles of Digital Transmission (Kluwer Academic Publishers, 2002.
2. Прокис Дж. Цифровая связь. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.
3. Gagnon G., Choquette F., Belzile J., Gagnon F. «A simple and fast carrier recovery algorithm for high-order QAM» in IEEE Communications Letters November 9(10) (IEEE, 2005). Pp.918-920.
4. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов. М.: Радио и связь, 1989. 440 с.
5. Джиган В.И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. М.: Техносфера, 2013. 528 с.
6. Giardino D., Cardarilli G., Nunzio L., Fazzolari R., Nannarelli A., Spano S. «M-PSK Demodulator with Joint Carrier and Timing Recovery» in IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs 68(6) (IEEE, 2021). Pp.1912-1916.
7. Devi U., Madhavi D., Kumar A. “Carrier recovery and clock recovery for QPSK demodulation” in International Journal of Research in Engineering and Technology 03(05) (2014). Pp. 304-311.
8. MathWorks. Bit Error Rate Analysis Techniques. https://www.mathworks.com/help/comm/ug/bit-error-rate-analysis-techniques.html.
9. Zhuravlev A.P. Synchronization Algorithm for a Satellite Communication Signals Demodulator in High Carrier Shift Conditions in IEEE Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications (IEEE, 2019).
10. Savory S.J. “Digital Filters for Coherent Optical Receivers” in Optics Express 16, 2008. Pp.804-817.

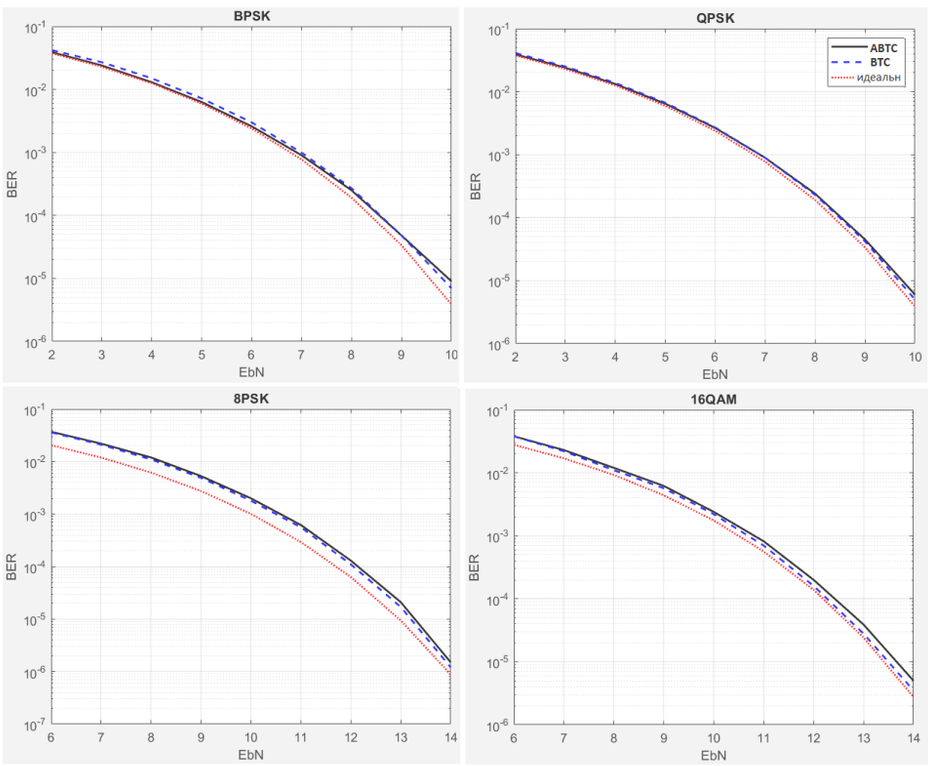




**Рис. 4.** Качество работы демодуляторов АВТС

УДК 623.746.4–519; 621.396.969; 621.391

# МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЧИСЛА ПОВТОРЕНИЙ В РАДИОКАНАЛЕ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ СООБЩЕНИЙ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ, ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ МУЛЬТИПЛИКАТИВНОЙ ПОМЕХИ

# METHODOLOGY FOR CALCULATING THE NUMBER OF REPETITIONS IN THE RADIO CHANNEL OF FEEDBACK MESSAGE TRANSMISSION SYSTEMS OPERATING UNDER THE INFLUENCE OF MULTIPLICATIVE INTERFERENCE

Максим Сергеевич Бродский
начальник лаборатории
Военный институт (научно-исследовательский)
ВКА имени А.Ф.Можайского
Адрес: 197198, Санкт-Петербург,
ул. Ждановская, д.13
Тел.: +7 (981) 983-96-63
E-mail: vka@mil.ru

Виталий Валерьевич Звонарёв
*кандидат технических наук*
начальник лаборатории
Военный институт (научно-исследовательский)
ВКА имени А.Ф.Можайского
Адрес: 197198, г. Санкт-Петербург,
ул. Ждановская, д.13
Тел.: +7 (911) 254-58-70
E-mail: vka@mil.ru

Александр Сергеевич Попов
*доктор технических наук, профессор*
старший научный сотрудник
Военный институт (научно-исследовательский)
ВКА имени А.Ф.Можайского
Адрес: 197198, г. Санкт-Петербург,
ул. Ждановская, д.13
Тел.: +7 (961) 806-26-58
E-mail: vka@mil.ru

**Аннотация**
В статье предложена методика, позволяющая определить среднее число повторений сообщения и оценить ресурс пропускной способности для канала систем передачи с обратной связью при наличии мультипликативной помехи.
**Ключевые слова:** система передачи с обратной связью, ошибка приема информационного символа, среднее число повторений сообщения, мултипликативная помеха.

**Summary**
The article proposes a technique that allows determining the average number of repetitions of a message and estimating the bandwidth resource for a channel of feedback transmission systems in the presence of multiplicative interference.
**Keywords:** feedback transmission system, error receiving an information symbol, average number of message repetitions, multiplicative interference.

## Введение

В настоящее время системы передачи с обратной связью находят применение при случайных изменениях параметров канала связи физического уровня [1,2]. В системах с переспросом используются модификации адаптивных протоколов, подстраивающихся под изменение условий передачи.

Так например, хорошо известны исходные формулы для расчета остаточной вероятности ошибочного приема символа в сообщении – Рош, вероятности необнаружения ошибки в сообщении – Рно, вероятности обнаружения ошибки в сообщении – Роо, вероятности правильного приема сообщения – Рпр, $\mu_{ср}$ – среднего числа повторений сообщения без воздействия мультипликативной помехи [1, 2]. Рассмотрим некоторые из них.

Пусть $p$ – ошибка приема информационного символа [1]:

$$p = \frac{1}{2}[1 - \Phi(\gamma h)], \quad (1)$$

где $h^2 = \frac{E}{N_ш}$ – отношение сигнал/шум. Здесь $E$ – энергия информационного символа на входе демодулятора; $N_ш$ – спектральная плотность помехи в виде белого шума.

Тогда

$$P_{пр} = (1 - p)^N, \quad (2)$$

где $N$ – число информационных символов в сообщении (пакете);

$$P_{\text{но}} \le \sum_{i=2t+1}^{N} \frac{C_{ni}^{i-1}}{C^{t}} p^{i} (1-p)^{N-i}, \quad (3)$$

выражение (3) записано для кода с хэммингово-вым расстоянием $d_{\min} = 2t + 1$, где $t$ – число обнаруживаемых ошибок в сообщении; $C_a^b$ – число сочетаний из $a$ по $b$;

$$\mu_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^{\infty} i P_{\text{оо}}^{i-1} (1 - P_{\text{оо}}) = \frac{1}{1 - P_{\text{оо}}}. \quad (4)$$

Система с решающей обратной связью автоматически изменяет избыточность кода $R_{\text{изб}_э}$ [1]

$$R_{\text{изб}_э} = 1 - \frac{k}{N\mu_{\text{ср}}}, \quad (5)$$

где $k$ – количество информационных символов в сообщении длиной $N$ символов.

Все эти формулы справедливы для случая конкретного значения вероятности ошибки приема элементарного символа в сообщении, определяемого отношением $h^2$. Но в канале с мультипликативной помехой $h^2$ – величина, изменяющаяся случайным образом во времени, в том числе и на длительности сообщения $T_c$. Даже если принять, что отношение $h^2$ за время $T_c$ изменится «мало», то и в этом случае для каждого сообщения все перечисленные характеристики непостоянны, случайны. Динамика процесса воздействия мультипликативной помехи в них не учтена. Поэтому задача расчета вероятностных и временных характеристик передачи сообщения в канале с обратной связью с учетом статистических и динамических характеристик мультипликативной помехи является актуальной.

### Расчет числа повторений в радиоканалах связи

В ряде работ авторов [4,5] изложен подход и методика расчета вероятности передачи сообщения длительности $T_c$, в течение которого отношение $h^2$ не становится ниже заданного значения, при котором величина $p$ не ниже требуемой. Обозначим эту вероятность $P_{\text{бо}}$. Вышеприведенные формулы справедливы, когда $P_{\text{бо}} = 1$. Как показано в работах [4,5] в реальных каналах это условие не выполняется. Величина $P_{\text{бо}}$ всегда меньше 1, а во многих случаях намного меньше.

Рассмотрим циклы операций, на основе которых выведены основные формулы [1]. При передаче сообщения возможны 3 следующих события: оо – обнаружение ошибки в сообщении; пр – правильный прием сообщения; но – необнаружение ошибки в сообщении. Повторение кодограммы сообщения осуществляется только при обнаружении ошибки. На *рисунке 1* показаны циклы передачи сообщений [1].

Точные значения вероятностных показателей канала получить сложно. Можно найти оценки снизу, т.е. в худшем случае. Для упрощения формализации постановки задачи примем, что канал передачи на канальном уровне имеет два состояния. Можно и больше, но при этом увеличится громоздкость вывода формул в ущерб наглядности.

Первое состояние канала, когда сообщение передается с вероятностью $P_{\text{бо}}$, когда вероятность ошибки приема символа сообщения $p_1$. Второе состояние, когда с вероятностью $(1 - P_{\text{бо}})$ сообщение передается с $p_2$. Для каждого состояния имеем $P_{\text{ноі}}$, $P_{\text{прі}}$, $P_{\text{ооі}}$, $\mu_{\text{срі}}$, где i ∈ {1, 2}. Графическое изображение циклов показано на *рисунке 2*.

Вероятность первого состояния – $P_{\text{бо}}$, второго – $(1 - P_{\text{бо}})$. При обнаружении ошибки в каждом состоянии передача сообщения повторяется. Идея введения состояний дискретного канала осуществляется в модели группирования ошибок в сообщении Гильберта-Эллиота [6].

Смена состояний канала моделируется простой марковской цепью и происходит при передаче каждого информационного символа внутри сообщения. В данной статье смена состояния происходит при передаче сообщения целиком.

Для анализа характеристик примем модель, аналогичную модели Гильберта, в которой принято, что ошибка обнаруживается с вероятностью $(1 - P_{\text{пр}})$.

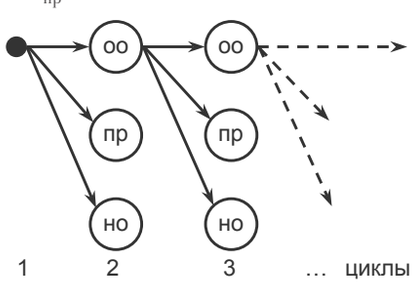



**Рис. 1.** Циклы повторения кодограмм сообщения

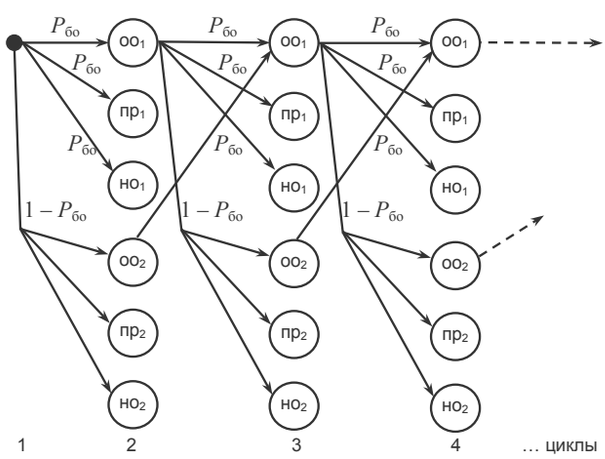



**Рис. 2.** Циклы повторения сообщения при двух состояниях канала

**Таблица 1**

Зависимости $P_{бо}$ от отношения интервала корреляции к длительности передачи сообщения при заданных условиях

| τ/T | 4.199 | 2.1 | 1.4 | 1.05 | 0.84 | 0.7 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $P_{бо}$ | 0,88 | 0,871 | 0,867 | 0,863 | 0.86 | 0,859 |

Во втором состоянии происходит нарушение связи с вероятностью $(1 - P_{бо})$. Графическое изображение циклов в этом случае показано на *рисунке 3*.

Из *рисунка 3* видно, что итоговая вероятность обнаружения ошибки равна

$$\tilde{P}_{оо} = P_{оо}P_{бо} + (1 - P_{бо}),$$

где $P_{бо}$, рассчитанная по релеевскому закону распределения случайной величины при заданных отношениях интервала корреляции ($\tau$) к интервалу длительности передачи сообщения ($T$), в соответствии с [4, 5] будет принимать значения, представленные в *таблице 1*. Расчеты $P_{бо}$ представлены для передачи сообщения в пригородной, холмистой местности, где среднеквадратическое отклонение составляет 7,5 дБ.

Итоговые значения вероятности правильного приема и необнаружения ошибки, соответственно равны $P_{пр} = P_{бо}P_{пр}$

$$\tilde{P}_{пр} = P_{бо}P_{пр}, \quad \tilde{P}_{но} = P_{бо}P_{пр}. \qquad (6)$$

Проверим нормировку

$$\tilde{P}_{оо} + \tilde{P}_{пр} + \tilde{P}_{но} = P_{бо}P_{оо} + (1 - P_{бо}) + P_{бо}P_{пр} + P_{бо}P_{но} =$$

$$= P_{бо}(P_{оо} + P_{пр} + P_{но}) + 1 - P_{бо} = 1. \qquad (7)$$

В выражении (7) учтено, что сумма в скобках равна 1, так как события «оо», «пр» и «но» есть полная группа событий. Очевидно, что события $\widetilde{оо}$, $\widetilde{пр}$ и $\widetilde{но}$ тоже полная группа событий.

Для расчета $\mu_{ср}$ используем значения из [5], где вероятность правильного приема сообщения за $T$ = 10 с без воздействия мультипликативной помехи равна 0,9994.

Следовательно: $P_{оо} = 1 - P_{пр} = 1 - 0{,}9994 \approx 0{,}0006$,

$$\mu_{ср} = \frac{1}{1 - P_{оо}} = \frac{1}{1 - 0{,}0006} = \frac{1}{0{,}9994} \approx 1{,}001.$$

В соответствии с (4) получим среднее число повторений сообщения за $T$ = 10 с с учетом воздействия мультипликативной помехи и предыдущих результатов измерений:

$$\tilde{\mu}_{ср} = \frac{1}{1 - \tilde{P}_{оо}} = \frac{1}{1 - [(1 - P_{бо}) + P_{бо}P_{оо}]} = 1{,}22542. \qquad (8)$$

Вычислим, насколько увеличилось среднее число повторений сообщения при передаче за $T$=10 с:

$$\Delta = \frac{\tilde{\mu}_{ср} - \mu_{ср}}{\mu_{ср}} = \frac{1.22542 - 1.001}{1.001} = 0.224. \qquad (9)$$

Среднее число повторений при данных условиях изменяется на 22,4%, т.е. действительная пропускная способность становится меньше на 22,4%.

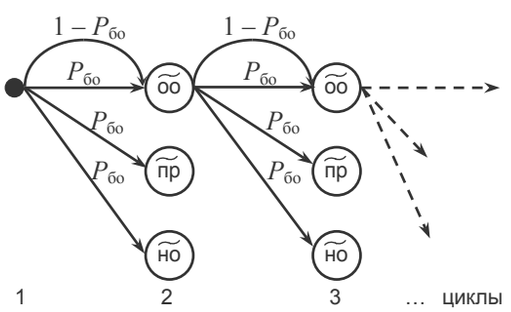



**Рис. 3.** Циклы повторения сообщения при «плохом» и «хорошем» состояниях канала

## Заключение

Таким образом, использование нового показателя качества канала при воздействии мультипликативной помехи позволяет рассчитать (спрогнозировать) канал передачи сообщений с учетом статистики и динамики воздействия мультипликативной помехи в канале системы передачи с обратной связью. Приведенные расчеты показывают, что существующая методика расчета характеристик систем передачи сообщений не учитывает динамику воздействия мультипликативной помехи, расчеты основаны на усреднении временного интервала.

Использование нового показателя качества канала с учетом воздействия мультипликативной помехи позволяет определить верхние оценки потери ресурса пропускной способности.

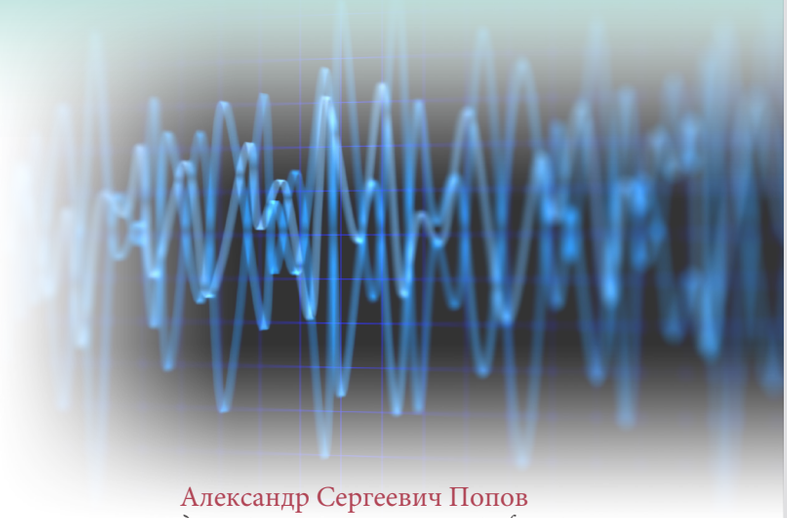
## Литература

1. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений. М.: Сов. радио, 1970. 728 с.
2. Буга Н.Н., Казаков А.А. Статистическая теория связи. Л.: ВИКИ им. А.Ф. Можайского, 1979. 342 с.
3. Каневский З.М. Передача информации с обратной связью. М.: Связь, 1976. 349 с.
4. Рид Р. Основы теории передачи информации. М.: Вильямс, 2005. 320 с.
5. Звонарёв В.В., Парамонов И.Ю., Попов А.С. Расчет надежности связи в канале с быстрыми замираниями сигнала по аппроксимирующей (редуцированной) вероятностной мере // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, 2012. № 635. С. 71-79.
6. Блох Э.Л., Попов О.В., Турин В.Я. Модели источников ошибок в каналах передачи цифровой информации. М.: Связь, 1971. 311 с.

УДК 621.396

# МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЗАПАСА РАДИОЛИНИИ ДЛЯ МЕДИАННЫХ И СРЕДНИХ ЗНАЧЕНИЙ МОЩНОСТИ СИГНАЛА

# THE CALCULATION METHODOLOGY FOR THE ENERGETIC RESERVE OF THE RADIO LINK FOR MEDIAN AND MEAN VALUES OF SIGNAL POWER



Виталий Валерьевич Звонарёв
*кандидат технических наук*
начальник лаборатории
Военный институт (научно-исследовательский)
ВКА имени А.Ф.Можайского
Адрес: 197198, г. Санкт-Петербург,
ул. Ждановская, д.13
Тел.: +7 (911) 254-58-70
E-mail: vka@mil.ru

Александр Сергеевич Попов
*доктор технических наук, профессор*
старший научный сотрудник
Военный институт (научно-исследовательский)
ВКА имени А.Ф.Можайского
Адрес: 197198, г. Санкт-Петербург,
ул. Ждановская, д.13
Тел.: +7 (961) 806-26-58
E-mail: vka@mil.ru

Михаил Юрьевич Худик
младший научный сотрудник
Военный институт (научно-исследовательский)
ВКА имени А.Ф.Можайского
Адрес: 197198, г. Санкт-Петербург,
ул. Ждановская, д.13
E-mail: vka@mil.ru

**Аннотация**

В статье решается задача расчета энергетического запаса радиолинии на входе приемного устройства. Обоснована упрощенная методика расчета вероятности успешной передачи сообщения (пакета) на сеансе связи с заданной длительностью, которая сводится к расчету среднего (медианного) значения мощности принимаемого сигнала, к нахождению значения вероятности правильного приема сообщения (пакета) при традиционном подходе и выборе соответствующей добавки к энергетическому запасу на замирания. Применение методики также позволяет определить среднее значение числа повторений сообщений в протоколе передачи пакетов с переспросом.

**Ключевые слова:** мощность сигнала, отношение сигнал-шум, энергетический расчет радиолинии, вероятность передачи сообщения, корреляционный приемник, помехоустойчивость радиоканала.

**Summary**

The article solves the problem of calculation of power stock of the radio line on head end. The simplified method of calculation of probability of successful transfer of the message (packet) on communication session with the set duration is proved. The methodology is reduced to calculation of mean (median) value of power of the accepted signal, to finding of value of probability of the correct reception of the message (packet) at traditional approach and choice of the corresponding additive for the energetic reserve on fadings. Application of technique also allows to define mean value of number of repetitions of messages in the transfer protocol of packets with redemand.

**Keywords:** signal power, signal-to-noise ratio, energy calculation of a radio link, probability of transfer of the message, correlation receiver, radio channel interference immunity.

## Введение

При проектировании и построении информационно-связных космических систем и комплексов требуется проведение расчета энергетического запаса радиолинии. При низких углах места линии визирования орбитального ретранслятора на геостационарной орбите, например, в высокоширотных областях поверхности Земли, возможны замирания радиосигнала, что существенно снижает качество канала передачи.

Энергетический запас показывает, во сколько раз мощность передающего устройства в канале с замираниями сигнала должна превосходить мощность ПРД в канале без замираний, чтобы обеспечить в среднем заданное значение качества связи при конкретной статистике.

Энергетический запас является общепринятой характеристикой радиоканала, используемой во всех энергетических расчетах при замираниях сигнала. Коэффициент запаса позволяет сравнить радиоканалы по энергетике при различных статистиках замираний. Однако для определения величины энергетического запаса могут быть использованы разные подходы.

В общем, оценка ослабления сигнала становится особо актуальной по причине необходимости поиска баланса между желаемым снижением мощности радиопередающих устройств и наблюдаемой тенденцией роста объемов передаваемой информации. Следует рассчитать различные параметры радиолинии для передачи информации с заданной скоростью и достоверностью, удовлетворяющей требованиям заказчика.

Чтобы обеспечить передачу информации с требуемой скоростью и вероятностью битовой ошибки следует провести анализ физических процессов и выполнить расчет параметров, которые влияют на распространение радиосигнала в естественных радиотрассах.

Возможность приема сигнала и доступность радиолинии определяются положительным значением энергетического запаса, рассчитываемого как разница между энергетическим потенциалом на входе приемного малошумящего усилителя и его чувствительностью.

Чтобы обеспечить надежную связь между устройствами, необходимо при проектировании провести расчет энергетического запаса конкретной радиолинии.

В статье предлагается отличный от традиционного методический подход, основанный на идее расчета вероятности неснижения уровня принимаемого сигнала в течение длительности передачи всего сообщения (пакета).

Цель настоящей статьи – разработать методику расчета энергетического запаса радиолинии, значения которого будут зависеть от дополнительного учета условий распространения радиоволн, влияющих на вероятность правильного приема всего сообщения (пакета), а не только информационного символа, на сеансе связи с заданной длительностью.

### Постановка задачи

При передаче информации обязательно должен быть предусмотрен энергетический резерв на компенсацию потерь при замираниях сигнала.

Для определения энергетического запаса необходимо знать энергетический потенциал устройств и условия распространения сигнала.

При распространении радиоволн по естественным радиотрассам на характеристики радиолинии влияет окружающая среда. Не считая потерь в свободном пространстве, радиоволна испытывает дополнительные потери: потери из-за ошибки наведения антенны, потери при распространении через атмосферу, поляризационные потери, потери на обтекателе антенны и др. Кроме того, существенное влияние оказывает наличие замираний сигнала.

В данной статье предложена методика расчета энергетического запаса радиолинии, использующая совместно двумерную и одномерную рэлеевские (как наиболее худшие условия) плотности вероятности изменений амплитуды сигнала. Во втором случае показателем качества канала принимается средняя вероятность правильного приема всего сообщения (пакета).

Представленная методика включает в себя:

- расчет реальной чувствительности приемника при передаче цифровых сигналов на примере когерентного приема;
- расчет энергетического запаса на замирания для радиолинии с рэлеевскими замираниями на основе одномерного подхода;
- расчет энергетического запаса на замирания для радиолинии с рэлеевскими замираниями на основе двумерного подхода;
- расчет энергетического запаса на замирания при расчете вероятности правильного приема сообщения (пакета).

В рамках методики требуется построить графики функций распределения Рэлея при нормировке к средней мощности сигнала и к медианному значению и графики вероятностей неснижения уровней сигналов для двумерных и одномерных случаев.

### Описание методики

Под медианным значением мощности сигнала в статье понимается мощность радиосигнала на входе приемного устройства в отсутствие замираний. В общем виде оно определяется по первому уравнению радиосвязи в виде [1]:

$$P_{пр}=P_{пер}L, \qquad (1)$$

где $P_{пер}$ [Вт] – мощность передающего устройства на входе фидерного тракта;

$P_{пр}$ – требуемая мощность радиосигнала на входе приемника;

$L=P_{пер}/P_{пр}$ – потери мощности в радиолинии от выхода передатчика до входа приемника в отсутствие замираний.

Как известно [1,2], потери мощности в канале (ослабление сигнала) определяются из выражения:

$$L=\frac{L_0 L_{пер} L_{пр}}{G_{пер} G_{пр}}, \qquad (2)$$

где $L_0$ – потери в среде распространения, в свободном пространстве;
$L_{пер}$ и $L_{пр}$ – потери в фидерах передатчика и приемника;
$G_{пер}$ и $G_{пр}$ – коэффициенты усиления антенн передатчика и приемника соответственно. Причем:

$$L_0 = \left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right)^2, \quad (3)$$

где  – длина волны несущего колебания;
$R$ – расстояние от передающего до приемного устройств.

Перевод мощностей $P_{пер}$ [Вт] и $P_{пр}$ [Вт] в «децибелы-на-Ватт» осуществим следующим образом [1,2]:

$$P_{пер}[\text{дБ}\cdot\text{Вт}] = 10\lg\frac{P_{пер}[\text{Вт}]}{1\text{Вт}} \quad P_{пр}[\text{дБ}\cdot\text{Вт}] = 10\lg\frac{P_{пр}[\text{Вт}}{1\text{Вт}} \quad (4)$$

Ослабление сигнала $L$ в формуле (2) в децибелах можно представить следующим образом:

$$L[\text{дБ}] = 10\lg L = L_0[\text{дБ}] + L_{пер}[\text{дБ}] + L_{пр}[\text{дБ}] - G_{пер}[\text{дБ}] - G_{пр}[\text{дБ}]. \quad (5)$$

Тогда формула (1), с учетом выражения (4), примет вид:

$$P_{пер}[\text{дБ}\cdot\text{Вт}] = P_{пр}[\text{дБ}\cdot\text{Вт}] - L_0[\text{дБ}] - L_{пер}[\text{дБ}] - L_{пр}[\text{дБ}] + G_{пер}[\text{дБ}] \quad (6)$$

Обычным требованием качества передаваемой информации в канале является $P^*_{ош}$ – вероятность ошибки приема символа, усредненная на интервале локальной стационарности случайного процесса изменения частотно-амплитудно-фазовых характеристик канала. При этом требования к принимаемой цифровой информации функционально связаны с отношением сигнал/шум $h^2$ на входе демодулятора. Например, для когерентного приема двоичного сигнала имеем [1,3]:

$$P_{ош} = \frac{1}{2}[1 - \Phi(\gamma h)], \quad (7)$$

где $\Phi(\gamma h) = \sqrt{\frac{2}{\pi}}\int_0^{\gamma h} e^{-t^2}dt$ – функция Крампа;
$\gamma$ – коэффициент, учитывающий вид манипуляции несущей: $\gamma_ф = \sqrt{2}$ – фазовый, $\gamma_ч = 1$ – частотный, $\gamma_а = \frac{1}{\sqrt{2}}$ – амплитудный.

При заданной $P^*_{ош}$ решается обратная задача $h^{*2} = f^{-1}(P^*_{ош})$, где $h^{*2}$ – требуемое отношение сигнал-шум для обеспечения требуемого качества приема цифровых символов $P^*_{ош}$.

При приеме радиосигнала с двоичной модуляцией и шумовой полосой частот демодулятора, равной полосе частот сигнала, имеет место соотношение [1-6]:

$$h^2 = \frac{P_{пр}}{n_ш k T \Delta f_{пр\,ш}} = \frac{P_{пр}}{P_ш}, \quad (8)$$

где $f_{пр\,ш}$ – шумовая полоса частот на входе решающей схемы;
$n_ш$ – коэффициент шума приемника;
$k$ – постоянная Больцмана;
$T$ – абсолютная температура по Кельвину, характеризующая шумовые свойства приемного тракта до входа решающей схемы;
$P_ш$ – мощность шума, приведенная ко входу решающей схемы.

Отсюда реальная чувствительность приемника $P_{рч} = P_{пр}$ равна [1, 7]

$$P_{рч} = h^{*2} n_ш k T \Delta f_{пр\,ш} = h^{*2} P_ш. \quad (9)$$

Исходя из требуемой $P^*_{ош}$, обратная задача энергетического расчета радиолинии в соответствии с формулой (1) определяется выражением

$$P_{пер} = L\,P_{рч}, \quad (10)$$

где в данном случае $P_{пер}$ – минимальная мощность передатчика, при которой обеспечивается условие

$$P_{ош} \le P^*_{ош}. \quad (11)$$

При наличии замираний в радиоканале условие (11) обеспечивается лишь с некоторой вероятностью, которая при традиционном одномерном подходе называется надежностью связи $H$, т. е.

$$H = P\{P_{ош} \le P^*_{ош}\},$$

где $P\{.\}$ – вероятность события $P_{ош} \le P^*_{ош}$.

Вводится дополнительное условие

$$H \ge H_{зад}. \quad (12)$$

Обеспечение условия (12) требует специальных мер борьбы с замираниями (многолучевостью) в канале, и, в частности, внесения дополнительного энергетического запаса $L_{доп}$.

Обозначим $L_\Sigma = L[\text{дБ}] + L_{доп}[\text{дБ}]$. Тогда выражение (10) приобретает вид

$$P_{пер}[\text{дБ}\cdot\text{Вт}] = P_{рч}[\text{дБ}\cdot\text{Вт}] + L_\Sigma[\text{дБ}]. \quad (13)$$

Для расчета $L_{доп}$ применяются различные подходы и методики, исходя из выбора показателей качества передачи информации в физическом канале, на канальном и сетевом уровне.

В свою очередь $L_{доп}$ [дБ] можно представить суммой

$$L_{доп} = L_р + L_з, \quad (14)$$

где $L_р$ есть запас на потери уровня сигнала за счет рельефа местности;
$L_з$ – энергетический запас на случайные замирания сигнала.

Покажем распределение потерь диаграммой, изображенной на *рисунке 1*.

В отсутствие случайных замираний справедливо равенство $P_{пр.мед} = P_{рч}$. Здесь $P_{рч}$ – реальная чувствительность приемника с учетом обеспечения требуемого значения средней вероятности ошибки приема символа – $P_{ош.треб}$; $P_{пр.мед}$ – медианная мощность сигнала на входе приемника. При наличии замираний считается, что $P_{пр}$ при-

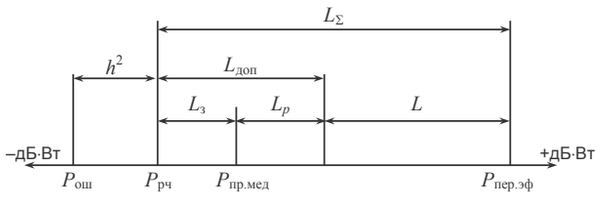



**Рис. 1.** Упрощенная диаграмма распределения потерь (уровня сигнала) в радиоканале

нимается медианным значением. Тогда для обеспечения $P_{ош.треб}$ при заданной надежности связи $H_{зад}$ в радиоканале необходимо увеличить энергетический потенциал радиолинии на величину энергетического запаса по мощности $L_з$ [1,8-11].

Известны и другие подходы к расчету средней мощности сигнала в условиях многих переотражений для радиоканалов подвижных объектов, основанные на формулах, полученных эмпирически при анализе статистической обработки реальных измерений уровней сигналов в городских, пригородных и других условиях [12,13].

Для расчета энергетического запаса на замирания для радиолинии с рэлеевскими замираниями обозначим коэффициент передачи канала по напряжению в части замираний через случайный параметр $\mu$. Плотность вероятности Рэлея $w(\mu)$ имеет вид [3]

$$w(\mu) = \frac{\mu}{\sigma^2}\exp\left(-\frac{\mu^2}{2\sigma^2}\right), \qquad (15)$$

где $\sigma^2$ – дисперсия флуктуаций (средняя мощность) квадратурных составляющих исходного двумерного гауссова случайного процесса.

Распределение вероятности (РВ), соответствующее выражению (15), равно

$$F(\mu) = 1-\exp\left(-\frac{\mu^2}{2\sigma^2}\right). \qquad (16)$$

Учитывая, что $2\sigma^2 = \mu_0^2$ и приняв относительную переменную $\xi = \frac{\mu}{\mu_0}$, можно показать, что функция распределения (ФР) вероятности случайной величины $\xi$ равна

$$F(\xi) = 1-\exp(-\xi^2). \qquad (17)$$

Найдем медианное значение $\mu_m$, исходя из формулы

$$F(\mu_m) = 0{,}5 = 1-\exp\left(-\frac{\mu_m^2}{2\sigma^2}\right). \qquad (18)$$

Тогда имеем $-\frac{\mu_m^2}{2\sigma^2} = -\ln 2$. Отсюда получается

$$\mu_m^2 = 2\ln 2\cdot\sigma^2 = 1{,}386\sigma^2;\ \frac{\mu_m^2}{2} = \ln 2 = 0{,}693;$$

$$\mu_m = \sqrt{2\ln 2\cdot\sigma^2} = \sqrt{2\ln 2}\cdot\sigma = \sqrt{1{,}386}\cdot\sigma = 1{,}177\sigma. \qquad (19)$$

Введем переменную, нормированную к медианному значению $\nu = \frac{\mu}{\mu_m}$, тогда выражение (15) приобретает вид [6]

$$w(\nu) = 2\ln 2\cdot\nu\exp(-\nu^2\ln 2) = 1{,}386\nu e^{-0{,}693\nu^2}. \qquad (20)$$

Распределение вероятности величины $\upsilon$ равно

$$F(\nu) = 1-e^{-0{,}693\nu^2}. \qquad (21)$$

Формулы (15) и (16) можно представить в другом виде [6]:

$$w(\mu) = \frac{1{,}386\mu}{\mu_m^2}e^{-0{,}693\frac{\mu^2}{\mu_m^2}}. \qquad (22)$$

Простой подстановкой $\nu = \frac{\mu}{\mu_m}$ в формулу (22) без учета правила преобразования переменной выражение (20) не получается.

Исходя из вышеизложенного, показатель надежности связи в канале с рэлеевскими замираниями в традиционном понимании (в одномерном виде) вычисляется по формуле

$$H = p\{\mu > \mu_{пор}\} = \exp\left[-0{,}693\left(\frac{\mu_{пор}}{\mu_m}\right)^2\right], \qquad (23)$$

или для случайной амплитуды $U$

$$H = p\{U > U_{пор}\} = \exp\left[-0{,}693\left(\frac{U_{пор}}{U_{мед}}\right)^2\right]. \qquad (24)$$

Представим функцию $F(\upsilon)$ в формуле (21) в логарифмическом масштабе, приняв

$$\nu = 10^{\frac{\nu[дБ\cdot В]}{20}} \text{ и } F_{лог} = \lg F, \qquad (25)$$

где $\upsilon$[дБ·В] – амплитуда в единицах децибел на Вольт;

$F_{лог}$ – десятичный логарифм, получаем

$$F_{лог}[\nu[дБ\cdot В]] = \lg\left[1-\exp\left(-0{,}693\cdot 10^{\frac{\nu[дБ\cdot В]}{20}}\right)\right]. \qquad (26)$$

Необходимо учитывать, что в формулах (15), (16), (18) и т.д. $2\sigma^2 = \mu_0^2$ – есть средний квадрат коэффициента передачи канала, т. е.

$$\mu_0^2 = \int_0^\infty \mu^2 w(\mu)d\mu.$$

Графики зависимостей (16) и (26) в логарифмическом масштабе показаны на рисунке 2 при нормировании к среднему и медианному значениям.

График показывает в логарифмическом масштабе, какова вероятность того, что уровень сигнала по оси абсцисс упадет ниже медианного значения – 2 или ниже уровня средней мощности – 1. Задавая требуемое значение надежности связи, определяют необходимый энергетический запас на рэлеевские замирания [2,7,14,15].

Далее рассмотрим методику расчета на примере двумерной рэлеевской плотности вероятности замираний амплитуды сигнала для случая двух временных сечений в начале и конце длительности передачи информации.

Двумерная плотность вероятности (ПВ) Рэлея для коэффициента передачи канала имеет вид [4,9,13,16]

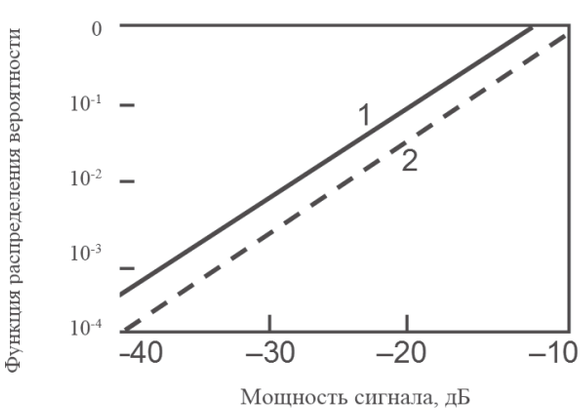



**Рис. 2.** Графики функций распределения Рэлея при нормировке: 1 – к средней мощности сигнала; 2 – к медианному значению

$$w(\mu_1,\mu_2)=\frac{\mu_1\mu_2}{\sigma^4(1-R^2)}\exp\left[-\frac{\mu_1^2+\mu_2^2}{2\sigma^2(1-R^2)}\right]I_0\left[\frac{R\mu_1\mu_2}{\sigma^2(1-R^2)}\right], \quad (27)$$

где $I_0(\cdot)$ – функция Бесселя нулевого порядка;
$R$ – коэффициенты корреляции $\mu_1$ и $\mu_2$.

Формула (27) может быть представлена в ином виде:

$$w(\mu_1,\mu_2)=\frac{4\mu_1\mu_2}{\mu_0^4(1-R^2)}\exp\left[-\frac{\mu_1^2+\mu_2^2}{\mu_0^2(1-R^2)}\right]I_0\left[\frac{2R\mu_1\mu_2}{\mu_0^2(1-R^2)}\right], \quad (28)$$

где $\mu_0^2=\mu_1^2=\mu_2^2$ – средний квадрат случайного процесса $\mu(t)$, второй начальный момент или средняя мощность случайного процесса $\mu(t)$.

Возможны четыре события, составляющие полную группу:

1) $(\mu_1<u,\mu_2<u)$; 2) $(\mu_1>u,\mu_2<u)$;
3) $(\mu_1<u,\mu_2>u)$; 4) $(\mu_1>u,\mu_2>u)$.

Обозначим вероятности событий в виде

$$P_1=P\{\mu_1<u,\mu_2<u\};\ P_2=P\{\mu_1\ge u,\mu_2<u\};$$
$$P_3=P\{\mu_1<u,\mu_2\ge u\};\ P_4=P\{\mu_1\ge u,\mu_2\ge u\}.$$

По аналогии с определением функции распределения вероятности обозначим

$$F_2(u)=P_1+P_2+P_3. \quad (29)$$

Выражение (29) определяет вероятность такого события, что хотя бы одна из случайных величин $\mu_1$ или $\mu_2$ имела значение меньше $u$; $P_4$ означает вероятность того, что одновременно $\mu_1$ и $\mu_2$ превышают величину $u$.

Справедливо выражение

$$P_4=P\{\mu_1\ge u,\mu_2\ge u\}=\int_u^\infty\int_u^\infty w(\mu_1,\mu_2)d\mu_1\mu_2. \quad (30)$$

Тогда имеем

$$F_2=1-\int_u^\infty\int_u^\infty w(\mu_1,\mu_2)d\mu_1\mu_2. \quad (31)$$

Введем новые переменные в виде

$$\nu_1=\frac{\mu_1}{\mu_0}\ \text{и}\ \nu_2=\frac{\mu_2}{\mu_0}$$

и найдем вид ПВ $w(v_1,v_2)$, используя формулу (28) и стандартное преобразование переменных

$$\left.\begin{aligned}v_1=\frac{\mu_1}{\mu_0}=\varphi_1(\mu_1)\Rightarrow\mu_1=\mu_0v_1=\varphi_1^{-1}(v_1);\\ v_2=\frac{\mu_2}{\mu_0}=\varphi_2(\mu_2)\Rightarrow\mu_2=\mu_0v_2=\varphi_2^{-1}(v_2).\end{aligned}\right\} \quad (32)$$

Определитель Якоби равен

$$\begin{vmatrix}\dfrac{d\varphi^{-1}(v_1)}{dv_1} & 0\\ 0 & \dfrac{d\varphi^{-1}(v_2)}{dv_2}\end{vmatrix}=\begin{vmatrix}\mu_0 & 0\\ 0 & \mu_0\end{vmatrix}=\mu_0^2. \quad (33)$$

Подставим выражения (32) и (33) в формулу (28)

$$w(v_1,v_2)=\frac{4v_1v_2}{\mu_0^2(1-R^2)}\exp\left[-\frac{v_1^2+v_2^2}{1-R^2}\right]I_0\left[\frac{2Rv_1v_2}{1-R^2}\right]\mu_0^2=$$
$$=\frac{4v_1v_2}{(1-R^2)}\exp\left[-\frac{v_1^2+v_2^2}{1-R^2}\right]I_0\left[\frac{2Rv_1v_2}{1-R^2}\right]. \quad (34)$$

Перепишем формулу (31) для относительных величин $v_1,v_2$:

$$F_2(u_v)=1-\int_{u_v}^\infty\int_{u_v}^\infty w(v_1,v_2)dv_1v_2. \quad (35)$$

Рассмотрим двумерную ПВ Рэлея с заменой среднего квадратического значения $\mu_m$ Из формулы (19) имеем [5,6]

$$\mu_m^2=\ln 2\cdot 2\sigma^2=\ln 2\cdot\mu_0^2\cong 0{,}693\mu_0^2, \quad (36)$$

отсюда $\mu_0^2=\mu_m^2/\ln 2$.

Заменим в формуле (28) $\mu_0^2$ на $\mu_m^2$, т. е.

$$w(\mu_1,\mu_2)=\frac{4(\ln 2)^2\mu_1\mu_2}{\mu_m^4(1-R^2)}\exp\left[-\frac{\ln 2(\mu_1^2+\mu_2^2)}{\mu_m^2(1-R^2)}\right]I_0\left[\frac{2\ln 2\cdot\mu_1\mu_2}{\mu_m^2(1-R^2)}\right]. \quad (37)$$

Введем новые относительные переменные в виде

$$\xi_1=\frac{\mu_1}{\mu_m},\quad \xi_2=\frac{\mu_2}{\mu_m},$$

и найдем ПВ $w(\xi_1\xi_2)$. При использовании стандартного преобразования вида (32), (33) получаем значение определителя Якоби, равное $\mu_m^2$. Тогда из выражения (37) получаем

$$w(\xi_1,\xi_2)=\frac{4(\ln 2)^2\xi_1\xi_2}{(1-R^2)}\exp\left[-\frac{\ln 2(\xi_1^2+\xi_2^2)}{(1-R^2)}\right]I_0\left[\frac{2\ln 2\cdot\xi_1\xi_2}{(1-R^2)}\right]. \quad (38)$$

Перепишем формулу (31) для переменных, отнесенных к медианному значению:

$$F_2(u_\xi)=1-\int_{u_\xi}^\infty\int_{u_\xi}^\infty w(\xi_1,\xi_2)d\xi_1\xi_2. \quad (39)$$

Используя изменения вида (25) перепишем все итоговые формулы в логарифмическом масштабе.

Применим преобразование переменной аргумента функций в децибельную форму, т. е.

$$v=10^{\frac{z[\text{дБ}]}{20}}. \quad (40)$$

Функцию распределения переведем в логарифмический масштаб. Тогда имеем:

- из формулы (39) получаем функцию распределения замираний относительно медианного значения для двумерного случая

$$D_1(z)=\lg F_2(z)=\lg\left\{1-\int_{10^{\frac{z}{20}}}^\infty\int_{10^{\frac{z}{20}}}^\infty w(\xi_1,\xi_2)d\xi_1\xi_2\right\}; \quad (41)$$

- из формулы (35) получаем функцию распределения замираний относительно корня из среднего значения мощности процесса замираний для двумерного случая

$$D_3(z)=\lg F_2(z)=\lg\left\{1-\int_{10^{\frac{z}{20}}}^\infty\int_{10^{\frac{z}{20}}}^\infty w(v_1,v_2)dv_1v_2\right\}; \quad (42)$$

- из формулы (26) получаем функцию распределения замираний относительно медианного значения для одномерного случая

$$F_3(z)=\lg\{1-\exp(-0{,}693\cdot 10^{\frac{z}{20}})\}; \quad (43)$$

- из формулы (17) получаем функцию распределения замираний относительно корня из среднего значения мощности процесса замираний для одномерного случая

$$F_4(z)=\lg\{1-\exp(-10^{\frac{z}{20}})\}. \quad (44)$$

**Пример реализации методики**

Исследование эффективности разработанной методики осуществлялось на основе математического моделирования процесса, исходя из полученных выше формул (41) - (44), где имеем $D_1(z)$ и $F_3(z)$ – функции распределения замираний относительно медианного значения для двумерно-

го и одномерного случаев соответственно, а $D_3(z)$ и $F_4(z)$ – функции распределения относительно корня из среднего значения мощности процесса замираний для двумерного и одномерного случаев соответственно. Графики этих функций показаны на *рисунке 3*. Эти графики являются основой для определения запаса на замирания в канале в одномерном случае (надежность связи) и двумерном случае (вероятность безобрывной связи) относительно средней мощности и медианного значения. Под вероятностью безобрывной связи понимается вероятность того, что на заданном временном интервале сеанса связи уровень сигнала не опустится ниже порогового (заданного) уровня.

Из выражения (19) следует, что отношение медианной мощности к средней равно

$$\frac{\mu_m^2}{\mu_0^2} = \ln 2 = 0{,}6931.$$

На *рисунке 3* также изображены графики

$$F_5(z) = D_1(z) - F_3(z) \text{ и } F_6(z) = D_3(z) - F_4(z),$$

показывающие функции разностей двумерной и одномерной ФР для аргументов $z$, выраженных в децибелах. Видно, что при интересных для практики уровней замираний эти разности приближенно равны 0,2999 (в логарифмическом масштабе).

С другой стороны, задавая одно и то же значение вероятности замираний, например, $0{,}01=10^{-2}$, т. е. $D_1(Z_1)=-2$ и $F_3(Z_2)=-2$, получаем $z_1 \approx -21{,}39$ дБ и $z_2 \approx -18{,}39$ дБ. При этом оказывается $z_2=z_1+3$ или $z_1-z_2=3$ дБ. Расчеты делались при значении коэффициента корреляции $R=0{,}5$.

## Заключение

Представленные результаты показывают, что при данных условиях для обеспечения заданной вероятности передачи сообщения (пакета), равной величине $1 - 10^{-2}=0{,}99$, необходимо увеличить энергетический запас на замирания на 3 дБ, т. е. в два раза. Если же рассмотреть разницу между результатами, полученными с использованием традиционного подхода, и предлагаемой методики расчета вероятности успешной передачи сообщения при одном и том же значении уровня замираний, то разность в логарифмических единицах составит примерно $0{,}299 \approx 0{,}3$.

Зная закон и параметры распределения замираний, в том числе интервалы корреляции, длительности сообщений и требуемые значения вероятности правильного приема сообщения (пакета) для одномерного случайного процесса, можно использовать заранее рассчитанные значения поправок для нахождения энергетического запаса на замирания, обеспечивающего требуемые вероятности правильного приема сообщения (пакета) на сеансе заданной длительности, а также можно определить среднее значение числа повторений сообщений в протоколе передачи сообщений (пакетов) с переспросом и т. д.

Таким образом, разработанная в статье методика расчета вероятности успешной передачи сообщения (пакета) по двумерной ПВ замираний сводится в упрощенном виде к расчету среднего (медианного) значения мощности принимаемого сигнала, к нахождению значения вероятности правильного приема сообщения (пакета) при традиционном подходе и выборе соответствующей добавки к энергетическому запасу на замирания, определяемые по таблице или номограмме для обеспечения требуемых вероятностей успешной передачи сообщения (пакета) при их заданной длительности.

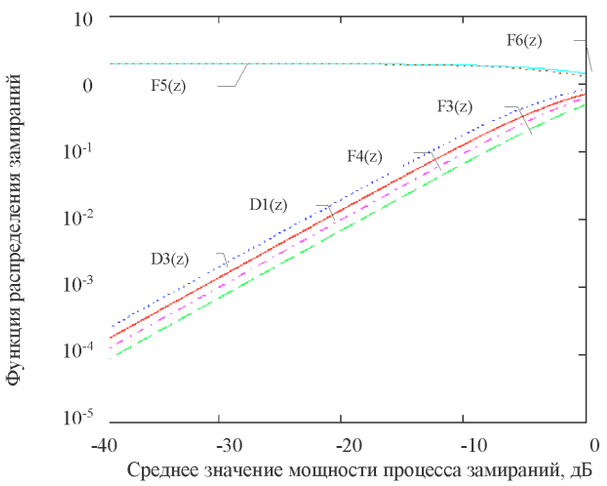
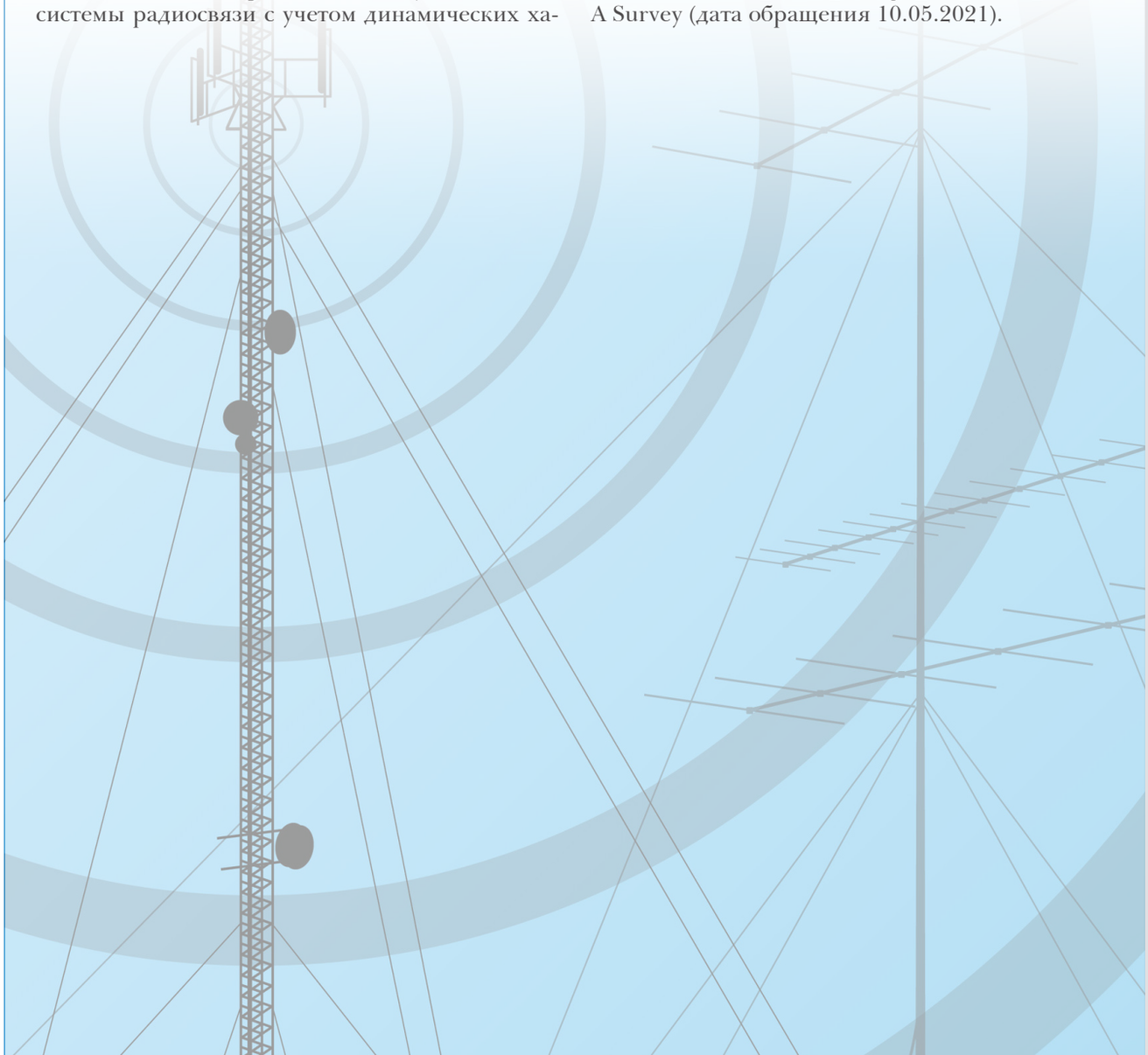


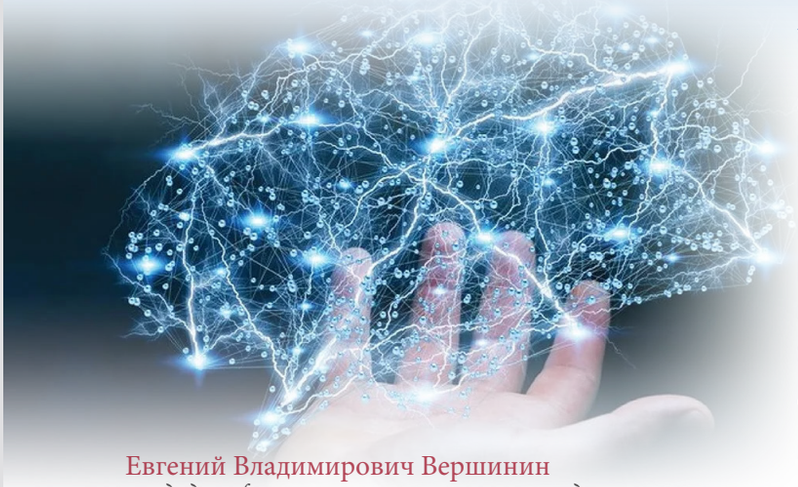

**Рис. 3.** Графики функций вероятностей неснижения уровней сигналов для двумерных ($D_3$ и $D_1$) и одномерных ($F_4$ и $F_3$) случаев

## Литература

1. Волков Е.А., Куликов В.В. Методики расчета радиорелейных и тропосферных линий при планировании их развертывания. Л.: ВАС, 1987. 111 с.
2. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений. М.: Сов. радио, 1970. 728 с.
3. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Сов. радио, 1968. 504 с.
4. Slepian D. Permutation modulation, D. Slepian, Proceedings of the IEEE, 1965, vol. 53, no. 3, pp. 228-236.
5. De Cola T. Reliability options for data communications in the future deep-space missions, T. De Cola, E. Paolini, G. Liva, G. Calzolari, Proceedings of the IEEE, 2011, vol. 99, no. 11, pp. 2056-2074.
6. Спилкер Дж. Цифровая спутниковая связь: пер. с англ. Под ред. В. Маркова. М.: Связь, 1979. 592 с.

7. Голдсмит А. Беспроводные коммуникации. М.: Техносфера, 2011. 904 с.
8. Ошерович П.Г. Расчет радиорелейных и тропосферных линий связи при их планировании и строительстве. Л.: ВАС, 1974. 47 с.
9. Быховский М.А. Гиперфазовая модуляция – оптимальный метод передачи сообщений в гауссовских каналах связи. М.: Техносфера, 2018. 310 с.
10. Быховский М.А. Передача коротких сообщений в системах спутниковой связи с перестановочной модуляцией и кодами Рида-Соломона // Электросвязь, 2021. №3. С.15-21.
11. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. М.: Связь, 1965. 400 с.
12. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. М.: Сов. радио, 1966. 680 с.
13. Звонарёв В.В., Агеев Ф.И., Ворона М.С., Попов А.С. Методика расчета помехоустойчивости системы радиосвязи с учетом динамических характеристик случайных замираний сигнала // Радиотехника, 2018. №5. С.92-99.
14. Звонарёв В.В., Карабельников И.А., Парамонов И.Ю., Попов А.С. Вероятностная модель спутникового радиоканала связи при малых углах места // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2017. Т.4. №.2. С.38-42.
15. Звонарев В.В., Попов А.С., Пряхин В.А., Шаймарданов А.М. Развитие теории передачи дискретных сообщений в канале с замираниями сигналов на основе многомерной редуцированной вероятностной меры и ее применение // Труды ВКА имени А.Ф.Можайского. СПб.: ВКА, 2016. №657. С. 57-63.
16. Liva G. Code Design for Short Blocks: A Survey, G. Liva, L. Gaudio, T. Ninacs, T. Jerkovits, available at: https://www.researchgate.net/publication/308883843_Code_Design_for_Short_Blocks A Survey (дата обращения 10.05.2021).





УДК 004.032

# ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МЕТОДОВ КЛАССИФИКАЦИИ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ

# THE EFFICIENCY OF INTELLIGENT CLASSIFICATION METHODS IN PREDICTING CARDIOVASCULAR DISEASES

Евгений Владимирович Вершинин
*кандидат физико-математических наук, доцент*
заведующий кафедрой «Системы обработки информации»
Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана
Адрес: 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2
Тел.: 8 (910) 510-73-50
E-mail: yevgeniyv@mail.ru

Вероника Анатольевна Фёдорова
*кандидат технических наук, доцент*
доцент кафедры «Защита информации»
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Адрес: 105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, к. 12
Тел.: 8 (985) 815-53-21
E-mail: Bmstukf@mail.ru

Анастасия Владимировна Ткаченко
аспирант
ассистент кафедры «Системы обработки информации»
Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана
Адрес: 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2
Тел.: 8 (910) 606-44-55
E-mail: tkachenko_av@bmstu.ru

**Аннотация**
В статье описаны методы «Дерево решений», MLP, SVM, k-средних, их достоинства и недостатки. Спроектирована модель RNN-GRU для прогнозирования сердечно-сосудистых заболеваний. Выполнено сравнение данных методов по эффективности прогнозирования и временным затратам.
**Ключевые слова:** сердечно-сосудистые заболевания, нейронная сеть, GRU, интеллектуальный анализ данных, метод «Дерево решений», MLP, SVM, метод k-средних, глубокая рекуррентная сеть, эффективность прогнозирования, время прогнозирования.

**Summary**
The article proposes the methods of «Decision Tree», MLP, SVM, k-means, their advantages and disadvantages. The RNN-GRU model is designed to predict cardiovascular diseases. The comparison of these methods on the efficiency of predicting and the time spent has been made.
**Keywords:** cardiovascular diseases, neural network, GRU, data mining, «Decision tree», MLP, SVM, k-means, deep recurrent network, prediction efficiency, prediction time.

## Введение

Сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) являются одной из основных проблем человечества. По данным ВОЗ в 2019 году количество смертей превысило показатель 2000 года на 16%, что составило около 9 миллионов человек, и по прогнозам к 2030 году цифра вырастет до 23,6 миллионов человек. Для предотвращения и успешного лечения заболеваний сердечно-сосудистой системы (ССС) необходимы точные методы, способные диагностировать и прогнозировать развитие ССЗ на ближайшее время [1].

Активное развитие интеллектуальных систем дает возможность решать сложные задачи. Применение моделей нейронной сети позволяет достичь нужных результатов, но необходимо правильно подобрать нейросеть с модификационными методами, которые улучшат систему в целом.

## Интеллектуальные методы прогнозирования

Из большого количества данных пациентов извлекаются атрибуты, которые в дальнейшем используются для интеллектуального анализа данных. Интеллектуальный анализ – это исследование больших наборов данных для из-

влечения скрытых и ранее неизвестных закономерностей, связей и знаний, которые трудно обнаружить традиционными статистическими методами [2].

*Метод «Дерево решений»*

Метод «Дерево решений» рекурсивно разделяет исследуемые данные в ветвях для построения дерева с целью повышения точности прогнозирования. В основе метода лежат математические алгоритмы для определения переменной и соответствующего порогового значения для переменной, которая разбивает входные данные на две или более подгрупп. Этот шаг повторяется на каждом листовом узле, пока не будет построено полное дерево. Задача алгоритма расщепления состоит в том, чтобы найти пару с переменным порогом, которая максимизирует однородность результирующих двух или более подгрупп выборок. Наиболее часто используемый математический алгоритм для расщепления включает получение информации на основе энтропии.

*Многослойный персептрон MLP с применением алгоритма обратного распространения ошибки*

MLP обладает мощной функцией аппроксимации для задач прогнозирования и классификации. При правильном размере и структуре многослойный персептрон способен обучать произвольно сложные нелинейные функции с произвольными уровнями точности. MLP - совокупность нелинейных нейронов (персептронов), организованных и связанных друг с другом в многослойной структуре с прямой связью (*рисунок 1*).

Модель отображает набор входных данных в набор соответствующих выходных данных. Основная задача нейронов во входном слое разделить входной сигнал $x_i$ между нейронами в скрытом слое. Каждый нейрон $j$ в скрытом слое суммирует свои входные сигналы $w_i$. $y_i$ определяется как функция $f$ суммы входных сигналов $x_i$ и связей нейронов $w_{ij}$ в скрытом слое:

$$y_i = f(\sum w_{ij} x_i) \quad (1)$$

где $f$ – пороговая функция (сигмоидальная или гиперболическая).

Алгоритм обратного распространения ошибки регулирует вес сети и значения смещения для уменьшения суммы квадратичных ошибок разности между заданным выходным сигналом $x$ и выходными значениями, вычисляемыми сетью $x'$ с помощью метода градиентного спуска:

$$SSE = \frac{1}{2} N \sum_{i=1}^{n} (x - x')^2 \quad (2)$$

где $N$ – количество экспериментальных точек данных, используемых для обучения

Процесс обучения многослойного персептрона занимает большое количество времени из-за увеличения весов во время обучения, что приведет к большим значениям на выходе сети, а производная активационной функции будет мала. Поскольку метод обратного распространения ошибки основан на градиентном спуске, где веса подстраиваются по направлению к минимуму, то сеть подвергается попаданию в локальный минимум в то время, как рядом находится более глубокий минимум, и тогда сеть не сможет выбраться из него [3]. Поскольку данные пациентов неустойчивы, соответственно данный метод тоже обладает неустойчивостью. Это объясняется изменением весов, которые влекут за собой использование дополнительной памяти. Тогда метод обратного распространения ошибки может быть бесполезным в решении задачи из-за несходимости.

*Метод опорных векторов SVM*

Метод опорных векторов SVM классифицирует данные с максимальным расстоянием и основан на статистической теории обучения. SVM использует нелинейное отображение для преобразования исходных данных обучения в более высокое измерение. В новом измерении ищется линейная оптимальная разделяющая гиперплоскость. SVM находит такую гиперплоскость, используя опорные векторы и поля, а затем выполняет задачи классификации, максимизируя

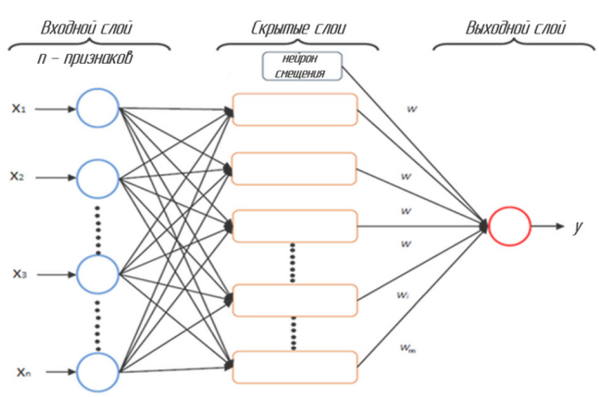



**Рис. 1.** Многослойный персептрон (MLP)

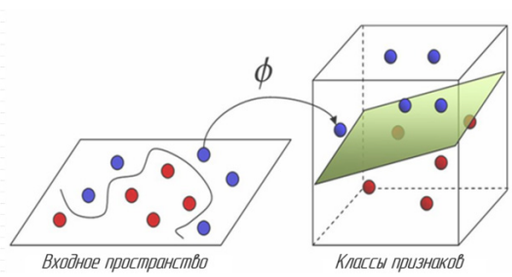



**Рис. 2.** Метод опарных векторов (SVM)

расстояния между объектами, разделяя их на два класса и минимизируя ошибки классификации (*рисунок 2*).

Основными множествами являются: обучающая выборка $X=\{x_1,\ldots,x_n\}$ и множества меток $Y=\{y_1,\ldots,y_n\}$, принадлежащих двум классам $w_1$ и $w_2$. Для обучающей выборки строится функция $f(x)$, при которой она принимает положительные значения для всех $x_i$, принадлежащих $w_1$ и отрицательных значений для всех $x_i$, принадлежащих $w_2$. При этом $y_i=1$, если $x_i \in w_1$ , и $y_i=-1$, если $x_i \in w_2$. Гиперплоскость задается формулой:

$$(w,x)+b=0 \quad (3)$$

где $w$ – весовой коэффициент;
$b$ – некоторое число,
а формула для разделения гиперплоскости имеет вид:

$$(w,x)+b\pm1=0 \quad (4)$$

Основным критерием метода является средняя ошибка классификатора, которая зависит от расстояния между гиперплоскостями. Чем больше расстояние между параллельными классификаторами, тем ошибка меньше. Расстояние между двумя границами гиперплоскостей имеет вид $2/|W|$, а $p_{1,2}=b\pm1/|W|$ – расстояния от гиперплоскостей до начала координат $2/|W|$, то на границах будет некоторое число $b$, которое является опорным вектором.

В прогнозировании SVM на этапе обучения выделяются независимые переменные (факторы), значения которых определяют принадлежность к подклассу, отвечающего за прогноз.

Метод опорных векторов является результативным методом для решения сложных задач и эффективно оперирует памятью. Из недостатков SVM можно выделить не прямую оценку вероятности, а использование дополнительной матрицы несоответствий, которая позволяет увеличить производительность.

*Метод k-средних*

Метод $k$-средних (быстрый кластерный анализа) основан на гипотезе о предполагаемом максимально различном количестве кластеров. Число $k$ выбирается на основе результатов, полученных ранее. Основная задача данного метода – это минимизация суммарного квадратичного отклонения точек классов от их центров.

Множество элементов заранее разбивается на $k$-кластеры, и в каждом кластере определяется центр. Векторы каждого класса вновь разбиваются на кластеры и находят свои центры кластеров. Это происходит до тех пор, пока не изменится внутрикластерное расстояние в соответствии с количеством итераций. Таким образом, на каждой итерации уменьшается суммарное квадратичное отклонение $V$, которое рассчитывается по формуле:

$$V=\sum_{i=1}^{k}\sum_{x\in S_i}(x-\mu_i)^2 \quad (5)$$

где $k$– количество кластеров;
$i=1,\ldots,k$, $S_i$ – получившиеся кластеры;
$\mu_i$ – центры кластеров.

Ниже представлено разбиение объектов на кластеры (*рисунок 3*).

Достоинства метода: простота, понятность и быстрое использование; недостатки: искажение среднего, большие затраты времени обучения при наличии больших данных.

*Глубокая рекуррентная сеть с применением подхода управляемых рекуррентных блоков GRU*

Рекуррентная нейронная сеть (RNN) имеет простую структуру со встроенным контуром обратной связи, позволяющим ей действовать как механизм прогнозирования. Последовательность входных данных после прохождения скрытого слоя создает последовательность выходных данных. Проблема в RNN заключается в исчезающем градиенте, что приводит к распаду информации во времени. Это значит, что накопленная полезная информация смешивается с ненужной, в результате чего данные о ранних состояниях теряются. Чем больше цепочка данных, тем сильнее происходят зашумления внутреннего состояния. Поэтому для сохранения нужной информации и отбрасывания ненужной применяется сеть GRU. Особенностью сети является наличие двух фильтров: обновления $z_t$ (6) и сброса состояния $r_t$ (7):

$$z_t=\sigma(W_z x_t+U_z h_{t-1}) \quad (6)$$

$$r_t=\sigma(W_r x_t+U_r h_{t-1}) \quad (7)$$

где $\sigma$ – сигмоидальная функция, позволяющая определять нужную и ненужную информацию;
$W_z$, $W_r$, – весовые матрицы $x_t$;

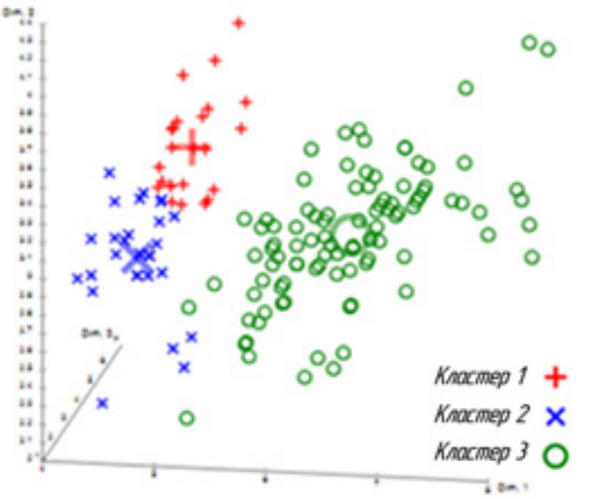



**Рис. 3.** Разбиение объектов на кластеры

$U_z$, $U_r$ – весовые матрицы $h_{t-1}$;
$x_t$ – входной вектор в момент времени $t$.

Текущий запоминающий блок $\tilde{h}_t$ (8) отвечает за промежуточное значение:

$$\tilde{h}_t = \tanh(W_h x_t + r_t \odot U h_{t-1}) \quad (8)$$

Выходной запоминающий блок $h_t$ (9) вычисляется после каждого $\tilde{h}_t$, который после сброса состояния определяет исключающие значения предыдущего слоя $h_{t-1}$:

$$h_t = z_t * h_{t-1} + (1 - z_t) \odot \tilde{h}_t \quad (9)$$

За счет фильтра обновления и фильтра сброса состояния GRU использует меньше памяти [4]. Это позволяет сделать выборку параметров, уменьшив их количество для обучения, в результате чего сеть обучается быстрее, а точность полученных данных получается высокой.

**Модель прогнозирования на основе GRU**

Входные данные о пациентах структурированы как: диагноз, лекарства и процедурные коды. Для представления данных в виде последовательности выбран векторный формат one-hot.

Все уникальные клинические коды были разделены на 3 группы:

- One-hot encoding («горячий вектор») подразумевает наличие какого-то одного фактора риска из всего множества.

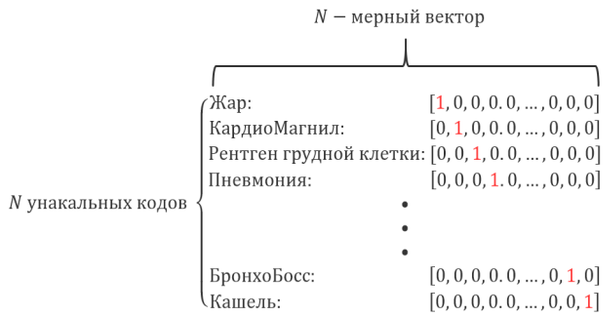



**Рис. 4.** Преобразование входных данных в one-hot вектор

- Grouped code vectors («управляемые векторы») группируют связанные коды диагностики и процедур.
- Medical concepts vectors («векторы медицинских данных») включают в себя все данные.

На *рисунке 4* приведено представление входной информации в виде набора однонаправленных векторов. Каждое из N уникальных данных имеет вид N-мерного вектора, в котором одно значение 1, остальные 0. Используя однонаправленные векторы, последовательность данных (*рисунок 5А*) преобразуется в последовательность однонаправленных векторов (*рисунок 5Б*). Диагностические коды были сгруппированы в 283 группы, коды лекарств сгруппированы по идентификатору универсального продукта в 96 групп, а коды процедур – в 244 группы.

На *рисунке 6* представлена модель GRU. Каждое посещение медицинского учреждения обозначим $T$ (*рисунок 6*), который принимает входной вектор $x_t$ (однонаправленные векторы – клинические коды) на каждом временном шаге $t$, сохраняя информацию в одном скрытом слое $h$, состояние которого меняется со временем ($h_{t-1}$, $h_t$, $h_{t+1}$). После перебора всех данных применяется логистическая регрессия к конечному вектору скрытого слоя, и получается значение $y$, оценивающее риск конкретного пациента для будущей диагностики медицинским учреждением.

**Сравнение эффективности работы методов классификации**

На основе работы [5] методы «дерево решений», MLP, SVM, $k$-средних, RNN-GRU были обучены и протестированы на эффективность за 6-месячный и 12-месячный период наблюдения прогнозирования, включая типы медицинских данных: One-hot encoding, Grouped code vectors, Medical concept vectors *(рисунок 7)*.

Значение средних площадей под ROC-

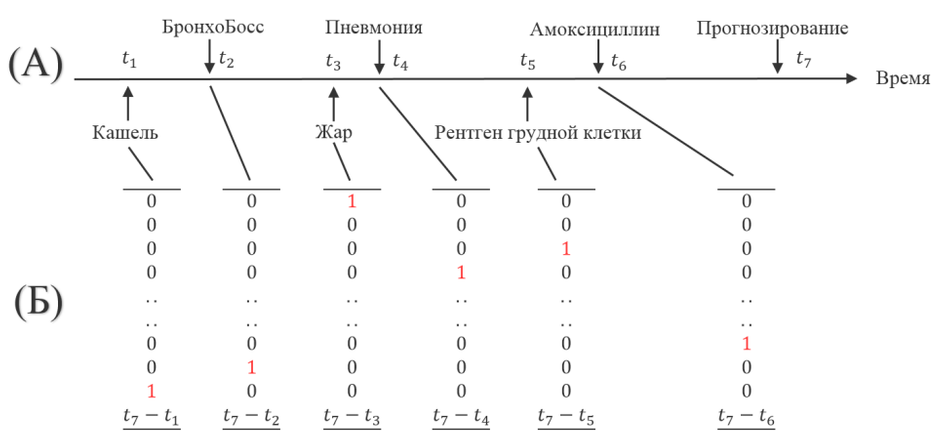



**Рис. 5.** (А) Предположение прогноза в момент времени $t_7$. (Б) Продолжительность построения one-hot вектора

кривой (AUC) кросс-валидации для всех моделей продемонстрировано на *рисунке 8*.

На *рисунке 8* цветами отмечены разные обучающие входные векторы, а столбцы представлены с учетом отклонения ошибок, полученных в результате кросс-валидации. На *рисунке 8* заметно, что модель GRU превосходит остальные [6].

Период наблюдения был увеличен до 18 месяцев (*рисунок 9*). Все модели были заново обучены и протестированы. Модель GRU превосходила все остальные методы с 0,922 AUC. Модели, обученные с использованием «Medical concept vectors» значительно превосходят модели, обученные с помощью «Grouped code vectors» и «One-hot encoding.

По данным ROC-кривых можно сделать вывод о том, что чем больший период времени рассматривается, и чем больше данных, тем система прогнозирования показывает более высокий результат прогноза заболевания сердца.

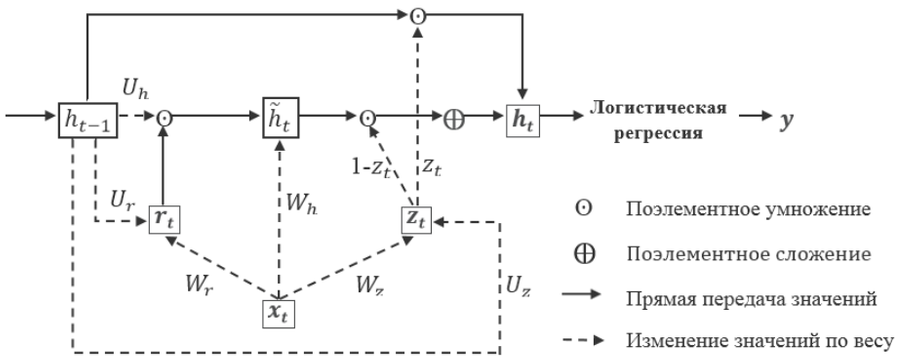



**Рис. 6.** Архитектура модели GRU

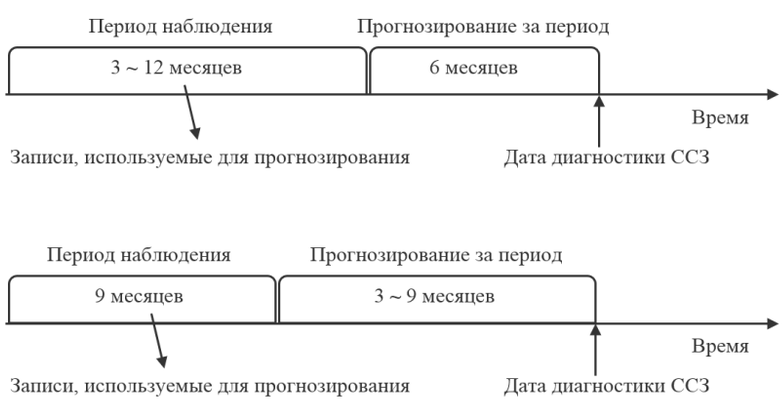



**Рис. 7.** Схемы периодов наблюдения и прогнозирования ССЗ

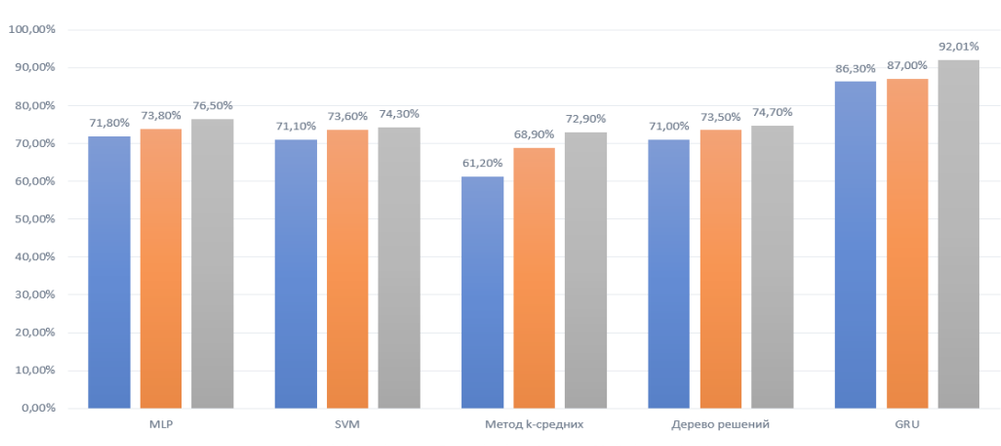



**Рис. 8.** Эффективность прогнозирования сердечных заболеваний за 6-месячный и 12-месячный периоды наблюдения прогнозирования

### Время прогнозирования методов классификации

В *таблице 1* показано время, необходимое для предоставления прогноза одному пациенту каждой моделью.

В эксперименте использовались модели, применяемые векторы медицинских данных для обучения. Время рассчитывалось путем усреднения времени, которое потребовалось моделям для прогнозирования тестовых наборов из 6-кратных значений с использованием только процессора [4].

Среди предоставленных данных *таблицы 1* следует, что наиболее быстрое обучение у дерева решений, а самое затратное время у метода *k*-средних. Модель прогнозирования с применением подхода GRU имеет большой показатель затратности времени.

### Вывод

По результатам сравнения методов классификации, обученных на основе одних и тех же данных, модель с применением технологии управляемых рекуррентных блоков показала хорошую прогностическую эффективность. Однако время обучения прогнозирования среди сравниваемых методов не является лучшим. Модель не всегда может справиться со случаями, где присутствуют одинаковые симптомы. Можно предположить, что этого можно избежать, увеличив объем данных.

### Литература

1. Белов Ю.С. Ткаченко А.В. Системы прогнозирования сердечно-сосудистых заболеваний // Спутник+. 49-я Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы науки», 2019. №49. С.103-104.
2. Jaymin Patel, Prof. Tejal Upadhyay, Dr. Samir Patel Heart Disease Prediction Using Machine learning and Data Mining Technique // IJCSC, 2016. Vol.7. Pp.129-137. [Электронный ресурс]. URL: http://csjournals.com/IJCSC/PDF7-1/18.%20Tejpal.pdf.
3. Tavares, Joao, Marco Deep Learning and Data Labeling for Medical Applications // Springer, 2016.
4. Charence Wong Deep Learning for Health Informatics // IEEE journal of biomedical and health informatics, january 2017. Vol.21. no.1.
5. Ткаченко А.В., Гуркина Е.Д., Вершинин Е.В. Разработка модели прогнозирования сердечно-сосудистых заболеваний с использованием ИНС // Известия Института инженерной физики, 2021. №1(59). С.61-65.
6. Овчинкина Т.В., Митин В.В., Кузьмин А.А. Применение гибридных нейронных сетей в прогностических моделях оценки функционального состояния сердечно-сосудистой системы // Современные проблемы науки и образования, 2013. №5. [Электронный ресурс]. URL: http://science-education.ru/ru/article/view?id=10551.

**Таблица 1**

Время прогнозирования методов для одного пациента

| Показатель производительности | Дерево решений | MLP | SVM | Метод *k*-средних | GRU |
|---|---|---|---|---|---|
| Время прогнозирования (сек) | 0,000002 | 0,000259 | 0,000034 | 36,66 | 0,020408 |

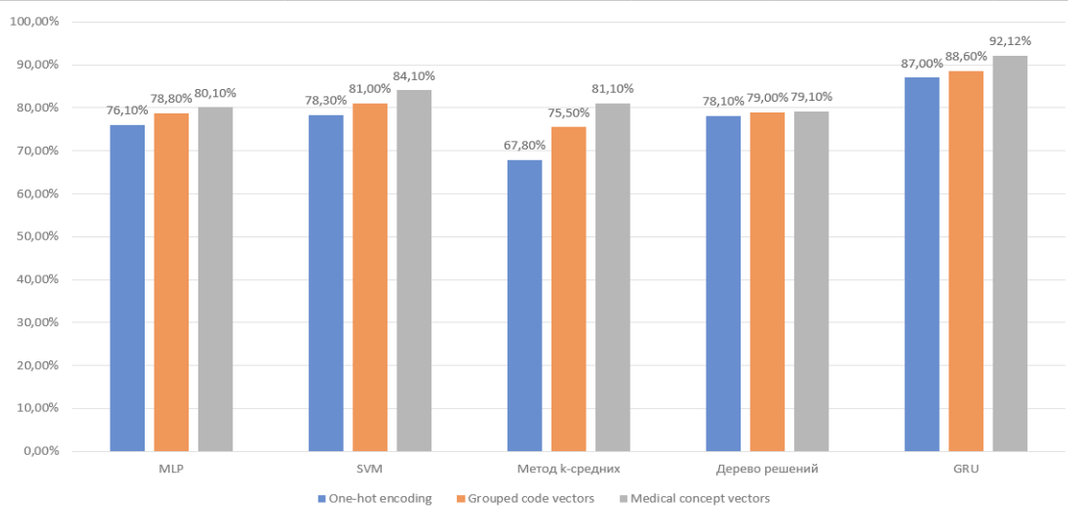



**Рис. 9.** Эффективность прогнозирования сердечных заболеваний за 18-месячный период наблюдения прогнозирования

УДК 338.583

# РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ СЕРВИСА РЕКОМЕНДАЦИИ НОВОСТЕЙ

# DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF THE RESULTS OF THE NEWS RECOMMENDATION SERVICE

Владимир Игоревич Колебцев
магистрант
Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана
Адрес: 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2
Тел.: +7 (910) 527-32-04.
E-mail: ybs82@mail.ru

Юрий Сергеевич Белов
*кандидат физико-математических наук*
доцент
Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана
Адрес: 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2
Тел.: +7 (920) 617-93-82
E-mail: ybs82@mail.ru

Екатерина Валентиновна Зеленцова
*кандидат технических наук*
доцент
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Адрес: 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5
Тел.: +7 (903) 715-49-99
E-mail: katez@mail.ru

**Аннотация**

Статья посвящена обзору архитектуры рекомендательного сервиса новостных статей, а именно подробное рассмотрение деталей структуры модуля «Рекомендация следующей статьи», главная цель которого заключается в предоставлении ранжированного списка новостных статей. Одной из важнейших задач при проектировании данного модуля была контекстуальная зависимость, т.е. модуль должен использовать такую информацию как местоположение, устройство, история чтения, непосредственно контекст статьи (в особенности параметры популярность и новизна, которые имеют свойство быстрого «затухания» с течением времени). Для тестирования спроектированного сервиса был использован открытый набор данных SmartMedia Adressa. При проведении эксперимента выборка данных осуществлялась таким образом, чтобы максимально имитировать реальное поведение пользователя при чтении статей на новостном ресурсе. Для оценки точности рекомендаций использовалась метрика MRR@n. Для сравнения использовались другие общепринятые алгоритмы рекомендаций на основе сеансов, а именно Sequential Rules, Item-kNN, Co-Occurrence, Co-Occurrence, SR-GNN, Vector Multiplication Session-Based kNN, Recently Popular, GRU4Rec, Content-Based. В то время как некоторые из выбранных базовых алгоритмов кажутся концептуально простыми, практическое применение показывает, что некоторые из них способны превзойти самые современные нейронные подходы для задач рекомендаций на основе сеансов.

**Ключевые слова:** рекомендация новостей, персонализированная рекомендация новостей, рекуррентная нейронная сеть, ранжированный список, MRR@n.

**Summary**

This article is devoted to an overview of the architecture of the recommendation service of news articles, namely, a detailed examination of the details of the structure of the module «Recommendation of the next article», the main purpose of which is to provide a ranked list of news articles. One of the most important tasks in the design of this module was contextual dependence, i.e. the module should use information such as location, device, reading history, the context of the article itself (especially the parameters popularity and novelty, which have the property of rapid «fading» over time). To test the designed service, an open data set of SmartMedia Adressa was used. During the experiment, data sampling was carried out in such a way as to maximally simulate the real behavior of the user when reading articles on a news resource. The MRR@n metric was used to evaluate the accuracy of the recommendations. For comparison, other generally accepted session-based recommendation algorithms were used, namely Sequential Rules, Item-kNN, Co-Occurrence, Co-Occurrence, SR-GNN, Vector Multiplication Session-Based kNN, Recently Popular, GRU4Rec, Content-Based. While some of the selected basic algorithms seem conceptually simple, practical application shows that some of them are able to surpass the most modern neural approaches for session-based recommendation tasks.

**Keywords:** news recommendation, personalized news recommendation, recurrent neural network, ranked list, MRR@n.

## Введение

Рассмотрим архитектурную абстракцию, которая содержит ряд общих строительных блоков для новостных рекомендательных систем, и которая может быть реализована различными способами, в зависимости от особенностей конкретной постановки задачи. По своей сути мета-архитектура состоит из двух взаимодополняющих модулей с независимыми жизненными циклами для обучения и вывода (*рисунок 1*):

• Модуль представления содержимого статьи (ПСС), используемый для изучения распределенного представления содержимого статьи;

• Модуль рекомендации следующей статье (РСС), ответственный за генерацию рекомендаций следующей статьи для текущих сеансов пользователя.

Предлагаемая мета-архитектура предоставляет контекстные рекомендации для пользователей в зависимости от их местоположения, времени и используемого устройства.

Данная архитектура была структурирована для поддержки изменений, действующих на уровне входов, выходов, модулей, подмодулей и их взаимодействий. Модули и подмодули могут быть созданы различными архитектурами по мере их развития. Такая модульная структура также делает простой оценку их компонентов.

**Модуль «Рекомендация следующей статьи» (РСС)**

В данной статье подробно будет рассмотрен модуль «Рекомендация следующей статьи», так как именно в него заложена функциональность предоставления ранжированного списка новостей.

Модуль РСС (*рисунок 2*), который предоставляет рекомендации для активных сессий, разработан как гибридная рекомендательная система, учитывающая как записанные взаимодействия пользователей, так и содержание новостных статей. Он также контекстно-зависим в том смысле, что использует информацию о контексте использования, например местоположение, устройство, предыдущие клики в сеансе и контекст статьи – популярность и новизна — которые быстро «затухают» с течением времени. Как правило, учет этих дополнительных факторов может иметь решающее значение для эффективности рекомендаций, основанных на сеансах [1]. Все эти входные данные необходимы для создания так называемого персонализированного пользовательского контекста внедряемой статьи. В результате получаются индивидуализированные вложения статей, представления которых зависят от контекста пользователя и других факторов, таких как текущая популярность и новизна статьи.

Модуль РСС основан на рекуррентных нейронных сетях, которые подходят для работы с последовательностями. В этом случае задача состоит в предсказании следующего клика, то есть в предсказании следующей статьи, которая может заинтересовать пользователя в его сеансе.

Модуль РСС состоит из трех подмодулей: контекстуальная рекомендация статьи, представление сессий и ранжирование рекомендаций.

***Подмодуль «Контекстуальная рекомендация статьи»*** отвечает за объединение входных данных для модуля РСС:

1. Содержимое статьи, на котором обучалась модель.
2. Контекстуальные свойства статьи (популярность и новизна).
3. Пользовательский контекст (например, время, местоположение, устройство и URL-заголовки).

Такая контекстуальная информация ценна в экстремальном сценарии холодного запуска в области рекомендаций новостей.

***Подмодуль «Контекстуальная рекомендация статьи»*** выводит персонализированное пользователем контекстное содержимое статьи, представления которого могут отличаться для одной и той же статьи в зависимости от контекста пользователя и текущего контекста статьи (популярность и новизна) [2].

***Подмодуль «Представление сессий»*** отвечает за моделирование краткосрочных предпочтений пользователей на основе последовательности взаимодействий (чтение новостей) в активном сеансе пользователя [3].

Входными данными для подмодуля «Представление сессий» является последовательность

**Рис. 1.** Абстрактная архитектура

чтения новостных статей пользователем в активном сеансе, представленная в виде персонализированных контекстных статей. Такой подход был разработан для того, чтобы использовать как содержание, так и контекст элемента и иметь возможность рекомендовать свежие статьи.

***Подмодуль «Представление сессий»*** выводит прогнозируемые статьи для последующего чтение, т. е. ожидаемый новостной контент, который пользователь хотел бы прочитать следующим в активном сеансе.

Подмодуль использует RNN для моделирования последовательности взаимодействий пользователей. Была выбрана UGRNN (Update Gate RNN), так как она показала лучшие результаты точности, чем GRU и LSTM. Архитектура UGRNN представляет собой компромисс между LSTM, GRU и стандартной RNN [4]. В этой архитектуре есть только один дополнительный шлюз, который определяет, следует ли обновлять или переносить скрытое состояние без изменений.

За ним следуют два полносвязных слоя с обратной связью, с функциями активации Leaky ReLU и tanh, результатом чего является прогнозирование следующей статьи.

***Подмодуль «ранжирование рекомендаций»*** отвечает за рекомендации статей для конкретного сеанса пользователя.

Большинство архитектур глубокого обучения, предлагаемых для сеансовых рекомендательных систем, моделируются как задача классификации, в которой каждый доступный элемент имеет выходной нейрон, то есть нейронная сеть выводит вектор, размерность которого равна числу доступных элементов.

Такой подход может сработать для систем, где количество элементов более стабильно, например фильмов и книг. Хотя, в динамическом сценарии новостных рекомендаций, где тысячи новостных сюжетов добавляются и удаляются ежедневно, такой подход потребовал бы включения дополнительных выходных нейронов для вновь опубликованных статей и, в конечном счете, полного переобучения сети.

По этой причине, целью оптимизации модуля РСС является максимизация подобия между прогнозируемой следующей статьей и персонализированным контекстом статьи, соответствующим прочитанной статье в текущей сессии (положительная проба), минимизируя ее подобие с отрицательной пробой (статья, которая не была прочитана пользователем в текущей сессии).

### Анализ результатов работы спроектированной системы

Для апробации предложенной модели рассматривается открытый набор данных

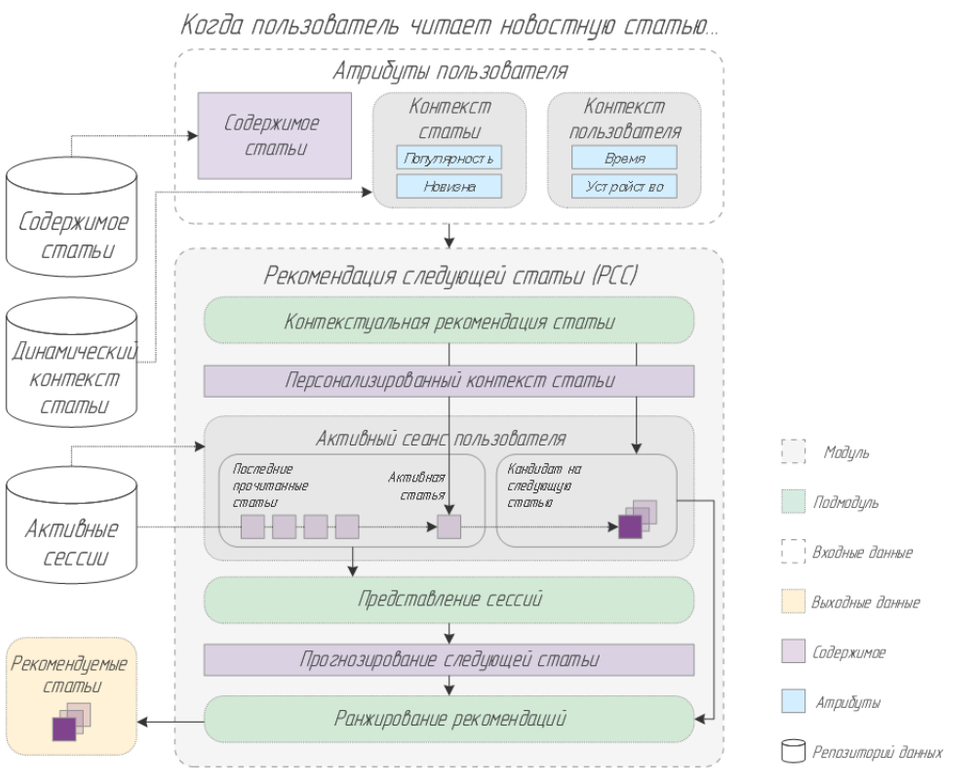



**Рис. 2.** Структура модуля «Рекомендация следующей статьи»

SmartMedia Adressa [5], который содержит около 2 миллионов посещений страниц норвежского новостного портала. В эксперименте использовалась облегченная версия набора, которая содержит информацию за интервал времени – 1 неделя.

Рекомендательная система постоянно обучалась на сессиях пользователей, упорядоченных по времени и сгруппированных по часам. Каждые пять часов рекомендации оцениваются в течение следующего часа. С этим интервалом в пять часов можно было выбрать разные часы дня в наборе данных для оценки. После того, как оценка следующего часа была сделана, этот час также рассматривается для обучения, пока не будет охвачен весь набор данных.

Для каждого сеанса в оценочном наборе рекомендательной системе постепенно «выдавался» один клик пользователя, записанный в логах, за другим.

Для каждого прогнозируемого клика создавался случайный набор, содержащий 50 рекомендуемых статей, которые не были просмотрены пользователем в течение сеанса (отрицательные образцы), плюс настоящая просмотренная статья (положительный образец). Затем алгоритм ранжировал список из 51 элемента.

Учитывая эти ранжированные списки, можно вычислить стандартные показатели поиска информации.

Для реалистичной оценки важно, чтобы выбранные отрицательные образцы состояли из статей, которые могли бы представлять определенный интерес для читателей и которые также были доступны для рекомендации на новостном портале в определенный момент времени. Поэтому для целей этого исследования в качестве рекомендуемых статей выбирались те, которые получили хотя бы один щелчок любым пользователем за предыдущий час.

Для экспериментов была использована реализация модуля «Рекомендация следующей статьи», который использует всю доступную информацию, а именно идентификатор статьи, контекст статье, содержимое статьи (в виде векторного отображения), метаданные статьи и др.

В *таблице 1* приведены результаты точности рекомендации статей, используя метрику MRR@10. Эта метрика является общепринятой при оценке алгоритмов рекомендации на основе сеанса [6,7].

Средний взаимный ранг (MRR@n) – это показатель ранжирования, который чувствителен к положению истинного следующего элемента (релевантного элемента) в списке. Как показано в уравнении (1), это среднее значение обратных рангов для выборки из списка рекомендаций – $Q$.

$$MRR@n = \frac{1}{Q}\sum_{i=1}^{Q}\begin{cases}\frac{1}{rank_i}, & \text{если } rank_i \le n\\ 0, & \text{в других случаях}\end{cases} \quad (1)$$

где $rank_i$ относится к ранговому положению релевантного элемента для -го списка рекомендаций. Если $rank_i$ больше $n$, эта рекомендация оценивается как 0.

Порог отсечения был принят в качестве $N$=10, что составляет около 20% от списка, содержащего 51 выборку статей (1 положительная выборка и 50 отрицательных проб).

Для сравнения использовались другие общепринятые алгоритмы рекомендаций на основе сеансов. Значения соответствуют среднему значению измерений, полученных в течение каждого часа оценки, в соответствии с планом оценивания, описанным выше.

В этом сравнении полученная модель превосходит другие базовые алгоритмы по показателю точности. Метод Content-Based является наименее точным, так как этот алгоритм не ориентируется на популярность статей, а только на сходство содержимого.

Можно заметить, что нейронные подходы, такие как SR-GNN и GRU4Rec, не смогли обеспечить лучшую точность, чем алгоритмы рекомендация на основе сеанса без нейронных моделей. Одна из причин заключается в том, что в реальном сценарии, который эмулируется в дан-

**Таблица 1**
Анализ точности

| Алгоритм | MRR@10 |
|---|---|
| Исследуемая модель | 0.3473 |
| Sequential Rules | 0.3092 |
| Item-kNN | 0.2923 |
| Co-Occurrence | 0.2911 |
| SR-GNN | 0.3043 |
| Vector Multiplication Session-Based kNN | 0.2901 |
| Recently Popular | 0.2502 |
| GRU4Rec | 0.2186 |
| Content-Based | 0.1362 |

ном эксперименте, нейронные модели (включая и исследуемую модель) не могут обновляться так часто из-за проблем асинхронного обучения модели и частого развертывания.

Кроме того, исследуемая модель учитывает «свежесть» статьи и рекомендует даже те статьи, которые не были обработаны во время обучения. SR-GNN и GRU4Rec, напротив, не могут давать рекомендации по элементам, с которыми не сталкивались во время обучения, что ограничивает их точность в реалистичном сценарии. В наборе данных, который используется в данной работе, около 4% кликов по статьям за каждый час оценки приходился на новые статьи, т.е. те статьи, которые не были замечены в предыдущие часы обучения. Анализ точности приведен на *рисунке 3*.

### Заключение

Взяв за основу мета-архитектуру рекомендательной системы новостей, была спроектирована система на основе рекуррентной нейронной сети (и ее различных модификаций). В статье описано внутреннее устройство подмодулей для основного модуля предоставления ранжированного списка новостных статей. Используя открытые данные, был проведен анализ точности рекомендации для составленных ранжированных списков. Для демонстрации корректных результатов эксперимента была приведена метрика оценки результатов – MRR@10, соответствующий графики изменения этого показателя так же был представлен. В результате, по этим показателям, исследуемая модель в некоторых ситуациях показывает лучшие результаты относительно общепринятых алгоритмов рекомендаций.

### Литература

1. Ghafati S.M., Beheshti A., Joshi A., Paris C., Mahmood A., Yakhchi S., Orgun M.A. A Survey on Trust Prediction in Online Social Networks // IEEE Access, July 2020, Режим доступа: https://ieeexplore.ieee.org/document/9142365.
2. Колебцев В.И., Белов Ю.С. Метрики, необходимые для составления ранжированного списка новостей для рекомендательной системы // Научное обозрение. Технические науки, 2021. №5. С.10-14. URL: https://science-engineering.ru/ru/article/view?id=1369.
3. Крюкова Я.Э., Белов Ю.С Прогнозирование поведения пользователей, основанное на машинном обучении // Актуальные вопросы науки, 2019. №50. С.165-167.
4. Collins. J.; Sohl-Dickstein. J.; Sussillo. D. Capacity and trainability in recurrent neural networks // Proceedings of the 5th International Conference on Learning Representations (ICLR'17), 2017.
5. SmartMedia Adressa News Dataset. URL: https://reclab.idi.ntnu.no/dataset/
6. Wu Y., Mukunoki M., Funatomi T., Minoh M., Lao S. Optimizing Mean Reciprocal Rank for person re-identification // 8-th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS), 2011.
7. Tang L., Liu Z., Zhang R., Duan Z., Liang Y. // Who Will Travel With Me? Personalized Ranking Using Attributed Network Embedding for Pooling, in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021.

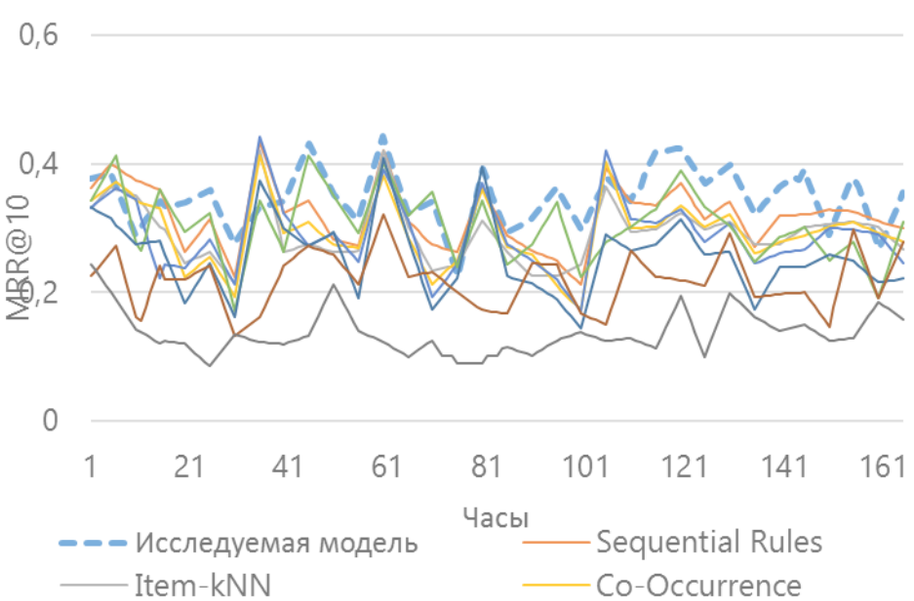
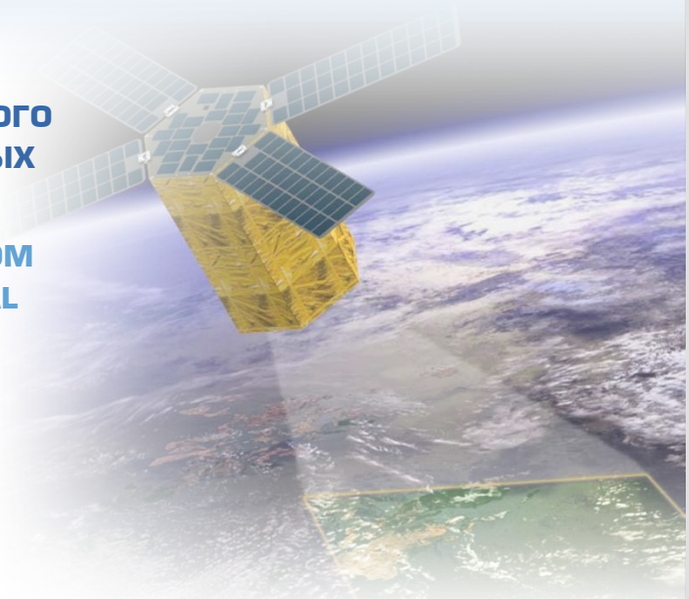



**Рис. 3.** Анализ точности (метрика MRR@10)

УДК 528.854

# РАСЧЕТ МАСКИ ОБЛАКОВ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ПРОСМОТРА МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ

# CALCULATION OF CLOUDS MASK FROM PREVIEW IMAGES OF MULTISPECTRAL SATELLITE IMAGES



Денис Михайлович Колпаков
магистрант
Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана
Адрес: 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2
Тел.: +7 (962) 178-41-33
E-mail: kolpakov.denis.mikhailovich@gmail.com

Евгений Владимирович Вершинин
*кандидат физико-математических наук, доцент*
заведующий кафедрой «Системы обработки информации»
Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана
Адрес: 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2
Тел.: 8 (910) 510-73-50
E-mail: yevgeniyv@mail.ru

Екатерина Валентиновна Зеленцова
*кандидат технических наук*
доцент
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Адрес: 105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5
Тел.: +7 (903) 715-49-99
E-mail: katez@mail.ru

**Аннотация**
В статье рассматривается алгоритм расчета маски облаков по изображениям предварительного просмотра снимков мультиспектральной космической съемки. Представлены результаты работы алгоритма. Описаны варианты улучшения результата. Проанализированы преимущества и недостатки алгоритма.
**Ключевые слова:** маска облачности, алгоритмы, спутниковые данные, изображения предварительного просмотра.

**Summary**
The article discusses the algorithm for calculating the cloud mask from the preview images of multispectral satellite imagery. The results of the algorithm are presented. The options for improving the result are described. The advantages and disadvantages of the algorithm are analyzed.
**Keywords:** clouds mask, algorithms, satellite data, previews.

## Введение

Для автоматических систем обработки данных дистанционного зондирования Земли (АСОД ДЗЗ) важно определять пригодность снимка для дальнейшей обработки. Различные алгоритмы обработки данных ДЗЗ в АСОД могут по-разному диктовать правила, по которым определяется пригодность снимка для получения корректного результата своей работы. Снимки для АСОД могут быть подобраны в автоматизированном или автоматическом режиме. Подбор в автоматизированном режиме предполагает вмешательство человека, на предмет валидации снимка по параметрам пригодности. Для автоматического режима подбор осуществляется на основе метаданных или дополнительных данных снимка [1].

В статье рассмотрен вариант, при котором именно облачность являться показателем пригодности снимка для обработки.

Маска облачности представляет собой определенную ценность для обработки данных ДЗЗ, обозначая зоны снимка, в которых затруднительно или невозможно производить обработку данных [2]. Такие зоны обычно рассматриваются как помехи.

АСОД может обойти проблему отсутствия маски следующими вариантами:

1. Для обработки могут допускаться снимки с минимальной облачность. Этот вариант плох тем, что нужные обрабатываемые области могут быть не перекрыты облаками, при условии не 100% облачности. А также снимки могут вообще быть не подобраны для автоматической обработки из-за их ограниченного количества.

2. Маска облачности может быть построена по исходным снимкам. Но тогда необходимо получить часть снимка или вообще весь снимок, а затем определенным алгоритмом произвести

расчет маски облачности. Этот вариант плох тем, что получение (скачивание) снимков и расчет маски облачности может быть достаточно долгим процессом.

В статье решается проблема отсутствия маски облаков, для отсеивания снимков на раннем этапе обработки данных – на этапе подбора мультиспектральной космической съемки, при условии наличия изображения предварительного просмотра.

### Расчет маски облаков на изображении предварительного просмотра

Изображение предварительного просмотра представляет собой миниатюру всего снимка, составленную из комбинации красного, зеленого, синего спектрального диапазона со значениями, преобразованными в 8-ми битный формат.

Алгоритм расчета маски облачности по таким изображениям реализуется следующими этапами:

1. Пиксельная бинаризация маски [3]. Бинаризация производится путем сравнения каждого пикселя с порогом бинаризации. Значение этого порога может быть определено для каждого канала в отдельности или быть единым. Каждый пиксель сравнивается с порогом, и если его значение больше (больше или равно) порога, то значению соответствующего пикселя в маке присваивается 1, в противном случае 0. На выходе этого этапа получается трехканальная бинарная маска.

2. Схлопывание каналов маски. На этом этапе трехканальная маска преобразуется в одноканальную. Схлопывание может производится разными механизмами – усреднения, суммирования, умножения значений соответствующих пикселей в разных каналах. В результате схлопывания в каждом пикселе обязано быть только бинарное значение – 1 или 0.

3. Геопривязка и векторизация маски [4,5]. В результате векторизации получается векторная геометрия, составленная из полигонов, представляющих из себя облака.

**Рис. 1.** Исходное изображение

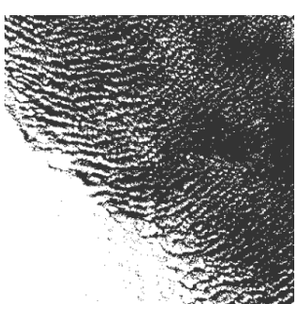


**Рис. 2.** Полученная маска облачности

### Результаты

Результаты расчета маски по изображению представлены на *рисунках 1* и *2*.

На *рисунке 3* представлена зависимость скорости работы алгоритма от облачности для изображения размером 512x512 пикселей.

Из этого графика следует, что скорость работы алгоритма максимальна при средней облачности. Это объясняется тем, что в этом промежутке больше всего выявляется полигонов облаков. Среднее время выполнения алгоритма для изображений размера 512x512 пикселей составляет 1 сек.

### Обсуждения

Работу алгоритма и результат можно улучшить, применив дополнительные действия и задав этапы постобработки. К таким действиям и этапам относятся:

1. Оптимизация порога бинаризации. Порог бинаризации должен быть подобран к каждому типу снимков в отдельности, из-за того, что каждый тип снимков уникален по своим характеристикам. К примеру, облачность на снимках Sentinel-2 L2A и Landsat-8 C2 Level-1 будет отличаться визуально из-за смещения последних к синему спектральному диапазону.

2. Упрощение топологии и сглаживание векторной геометрии маски облачности [6]. Этим этапом векторная геометрия избавляется от зубчатости пикселей миниатюры. Это позволяет сделать геометрию более «легкой», придавая облакам более естественный конур [7].

3. Фильтрация объектов по минимальной площади. Объекты, площадью в один или несколько пикселей, скорее всего не будут являться облаками, за исключением ситуации, при которой миниатюра составлена по снимку сверхнизкого пространственного разрешения и имеет достаточно малый размер. Такие объекты являются ложноположительными ошибками классификации. В качестве таких ложноположительных ошибок могут быть крыши домов, засеянные поля.

4. Вместо пиксельной бинаризации можно использовать усовершенствованные пространственные алгоритмы сегментации – алгоритмы машинного обучения или нейронные сети [8].

Представленный алгоритм имеет ряд преимуществ и недостатков. К основным преимуществам алгоритма относятся:

1. Простота реализации.

2. Скорость работы. Скорость может быть увеличена применением параллельности обработки отдельных частей изображения.

3. Подходит для типов спутниковых снимков,

имеющих любое пространственное разрешение. Так как обрабатывается миниатюра этих изображений, разрешение самого исходного снимка в таком случае не играет роль.

К главным недостаткам относятся:

1. Достаточно высокое наличие ложноположительных ошибок.

2. Не работает на съемке, на которой присутствует снежный покров.

Алгоритм стоит использовать только тогда, когда:

1. Область поиска, накладываемая на снимок, сравнительно мала с габаритами самого снимка. Если область поиска имеет больший размер, чем снимок, то вероятность того, что маска облаков пересечется с областью поиска, слишком высока.

2. Показатель облачности у снимков не универсален. Если облачность отсутствует, то искать облака там, где их нет – бессмысленно, а также если облачность приближается к 100%.

**Литература**

1. Информационная система «цифровая земля» для формирования постоянно обновляемого единого сплошного многослойного динамического покрытия территории Российской Федерации данными дистанционного зондирования земли различного пространственного разрешения и обеспечения доступа потребителей к его данным, продуктам и сервисам / П.А. Лошкарев, Д.И. Федоткин, А.Н. Белый [и др.] // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: Материалы VIII Международной научной конференции; электронное научное издание, Красноярск, 14-17 сентября 2021 года / Науч. редактор Е.А. Ваганов, отв. ред. Г.М. Цибульский. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2021. С. 39-40.

2. Соломатов Д. В., Афонин С.В., Белов В.В. Применение алгоритмов учета облачности в задаче атмосферной коррекции спутниковых данных ETM+/Landsat // Известия Томского политехнического университета, 2012. Т.321. №5. С.76-81.

3. Мищенко В.А., Коробкин А.А. Предварительная обработка изображения в процессе распознавания текста / Фундаментальные исследования, 2011. №8-3. С.652-655.

4. Загребин Г.И. Исследование по геопривязке картографического изображения в геоинформационной системе // Интерэкспо Гео-Сибирь, 2015. Т.1. №2. С.26-28.

5. Борисоглебский Д.А., Чепин Е.В. Усовершенствованный подход к задаче векторизации контуров на изображениях // Прикладная информатика, 2013. №2(44). С.89-93.

6. Simplipoly: Curvature-based polygonal curve simplification / C. Chuon, S. Guha, P. Janecek, N. D. C. Song // International Journal of Computational Geometry and Applications, 2011. Vol.21. No.4. Pp.417-429.

7. Rigau Ja. An Information-Theoretic Approach to Shape Complexity / Ja. Rigau, M. Sbert, M. Feixas // Computer Graphics & Geometry, 2006. Vol.8. No.1. Pp.10-21.

8. Использование нейронных сетей в задачах гидрометеорологии / Л.С. Крамарева, А.И. Андреев, В.Д. Блощинский [и др.] // Вычислительные технологии, 2019. Т.24. №6. С.50-59.

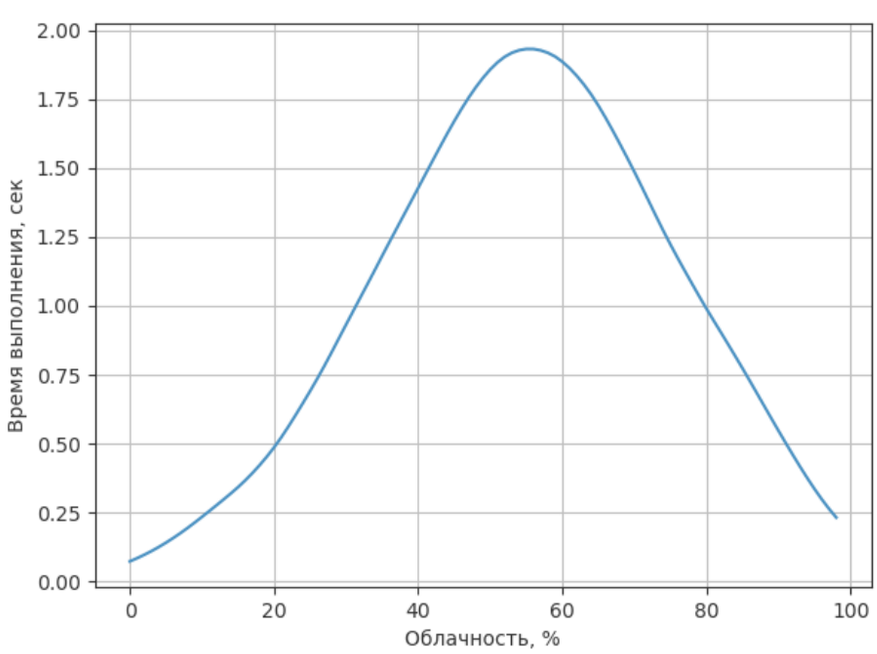



**Рис. 3.** Зависимость скорости выполнения от облачности

УДК 004.056

# ТЕОРИЯ ИНФОРМАЦИИ КАК МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНОВА РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ АДЕКВАТНОЙ ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

# INFORMATION THEORY AS A METHODOLOGICAL BASIS FOR SOLVING PROBLEMS OF ADEQUATE ASSESSMENT OF INFORMATION SECURITY CAPABILITIES

Анатолий Викторович Мазин
*доктор технических наук, профессор*
заведующий кафедрой «Защита информации»
Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана
Адрес: 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2
Тел.: 8 (910) 915-58-25
E-mail: mazinav@yandex.ru

Виктор Валерьевич Гайфулин
*кандидат технических наук*
доцент кафедры информационной безопасности
ФГКОУ ВПО «Краснодарский университет МВД РФ»
Адрес: 350005, г. Краснодар, ул. Ярославская, д. 128
Тел.: 8 (909) 992-14-07
E-mail: gayfulin2007@yandex.ru

Кирилл Сергеевич Чудин
ассистент
ФГБОУ ВО «МГТУ имени Н. Э. Баумана
(Национальный исследовательский университет)»
Адрес: 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1
Тел.: 8 (965) 329-55-15
E-mail: 4ydo-kirill@rambler.ru

Тимофей Борисович Ходырев
адъюнкт
ФГКОУ ВПО «Воронежский институт МВД РФ»
Адрес: 394065, г. Воронеж, просп. Патриотов, д. 53
Тел.: 8 (916) 607-97-31
E-mail: tim-hod@yandex.ru.

Иван Михайлович Тегенцев
начальник отделения
ВиТ ООЭиАИТКС ЦАиТП
ФКУ «Главный центр инженерно-технического
обеспечения и связи»
ФСИН РФ
Адрес: 119991, Москва, ул. Житная, д. 14
Тел.: 8 (915) 057-39-69
E-mail: tegentsev-im@fsin.gov.ru

**Аннотация**

Обосновывается актуальность использования аппарата математического моделирования для исследования проблем обеспечения конфиденциальности информации на объектах информатизации (ОИ) предприятий оборонно-промышленного комплекса (ОПК). Указывается, что корректность этих исследований зависит от адекватности используемых математических моделей и адекватности метода оценки исследуемых характеристик защищенности информации от утечки. Рассматриваются базовые для определения термина «адекватность» понятия «аналогия» и «модель». Приводится математическая модель показателя полноты мер технического контроля эффективности защиты информации от утечки по каналам ПЭМИН, а так же варианты выражений для определения адекватности данной модели и адекватности метода оценки моделируемого показателя на основе метрик количества информации по Хартли, и Шеннону, соответственно.

**Ключевые слова:** аналогия, адекватность, математическая модель, полнота мер технического контроля эффективности защиты информации от утечки по каналам ПЭМИН.

**Summary**

The relevance of using the mathematical modeling apparatus for the study of the problems of ensuring the confidentiality of information at the objects of informatization (OI) of enterprises of the military-industrial complex (MIC) is substantiated. It is indicated that the correctness of these studies depends on the adequacy of the mathematical models used and the adequacy of the method of evaluating the studied characteristics of information security from leakage. The basic concepts of «analogy» and «model» for the definition of the term «adequacy» are considered. A mathematical model of the indicator of the completeness of technical control measures for the effectiveness of information protection against leakage through the PEMIN channels is given, as well as variants of expressions for determining the adequacy of this model and the adequacy of the method of evaluating the modeled indicator based on the metrics of the amount of information on Hartley and Shannon, respectively.

**Keywords:** analogy, adequacy, mathematical model, completeness of technical control measures for the effectiveness of information protection against leakage through the PEMIN channels.

Анализ возможных методических подходов к реализации объективно существующего требования детального исследования угроз безопасности информации объектов информатизации (ОИ) различного назначения, а также детального исследования мер ее защиты информации от подобного рода угроз, приводит к необходимости учитывать весьма важное для исследования обстоятельство. Этим обстоятельством является отсутствие возможности проведения натурных экспериментов по исследованию информационных технологий, реализуемых в так называемой критической информационной инфраструктуре (КИИ), где риск нарушения безопасности информации, возникающий вследствие таких экспериментов, приводит к существенному ущербу [1]. Характерным примером объектов КИИ являются ОИ предприятий оборонно-промышленного комплекса (ОПК). Объектами угроз информационной безопасности здесь являются сведения конфиденциального характера о принимаемых управленческих решениях, связанных с:

- повышением эффективности функционирования предприятия в целях выпуска качественной высокотехнологичной продукции;
- ускорением и повышением гибкости производственных процессов;
- увеличением объемов выпуска продукции гражданского и двойного назначения;
- модернизацией используемой техники и технологий на предприятии;
- внедрением энергоэффективных решений;
- увеличением надежности и конкурентоспособности выпускаемой продукции.

Естественно, что последствия утечки такой информации, либо ее искажения, а так же блокирования доступа, при проведении натурных экспериментов, крайне отрицательно отразиться на выполнении предприятий ОПК своих задач.

Альтернативой натурным экспериментам по исследованию угроз безопасности информации предприятий ОПК, а также по исследованию мер обеспечения ее защищенности, является их исследование при помощи математических моделей.

В этих условиях корректность исследования будет зависеть от адекватности используемых математических моделей и адекватности метода оценки исследуемых характеристик защищенности информации.

С целью определения характеристики адекватности математической модели рассмотрим фундаментальные понятия теории моделирования – понятия аналогии, модели и ее адекватности.

Аналогия (*от греч. αναλογία – соответствие*) – подобие, равенство отношений, сходство предметов, явлений и процессов в каких-либо свойствах [2].

Средством сжатого объяснения (описания по образу аналогии) принципов внутренней организации, функционирования и особенностей исследуемого объекта (оригинала), непосредственное изучение которого, по разным причинам, невозможно или усложнено, является модель (модель аналогии).

Модель (*от лат. modulus – аналог, образец*) – система, исследование которой служит средством для получения информации о другой системе [3]. Модель является формой представления некоторого реального процесса [4].

Абстрактное представление реальности в математической форме, предназначенное для представления определённых аспектов этой реальности осуществляется при помощи математических моделей [5].

Математическая модель – формализуемая, то есть представляющая собой совокупность взаимосвязанных математических и формально-логических выражений, отображающих реальные процессы и явления. Исходя из того, что наиболее удобной формой для анализа описываемого явления или процесса являются аналитические модели, представляющие сущности явления или процесса в виде функциональных зависимостей, в практике исследований в области информационной безопасности широко используется аппарат аналитического моделирования [6].

Ввиду того, что моделирование предполагает принятие определенных допущений важным требованием к моделям является их адекватность [7].

Адекватность модели – совпадение свойств (функций, параметров, характеристик и т.п.) модели и соответствующих свойств моделируемого объекта. Адекватность модели является характеристикой ее аналогии реальному объекту.

Оценка адекватности модели состоит в проверке соответствия модели реальному объекту.

В теории моделирования широко распространен статистический подход к оценке адекватности моделей, основанный на сравнении с помощью статистических критериев либо средних значений откликов модели и объекта моделирования, либо дисперсий отклонений откликов модели от среднего значения откликов объекта. Вместе с тем следует отметить, что попытки использования такого подхода в сфере защиты информации, представленные в ряде работ, не могут характеризоваться как результативные. Применительно к задачам обеспечения защищенности информа-

ции предприятий ОПК это обусловлено тем, что статистический подход предполагает данные не только об известных характеристиках мер защиты, являющихся объектом моделирования, но и данные о характеристиках угроз безопасности информации предприятий. При этом последние, ввиду априорной неопределенности, связанной с представлением возможностей нарушителя по реализации такого рода угроз, не могут быть определены с точностью достаточной для корректной оценки адекватности.

В этой связи следует обратить внимание на то обстоятельство, что характеристика адекватности модели защищенности информации отражает субъективные взгляд исследователя относительно соответствия модели цели моделирования.

Проанализируем возможность оценки адекватности модели защищенности информации на предприятиях ОПК на примере математической модели показателя полноты мер технического контроля эффективности защиты информации от утечки по каналам ПЭМИН на ОИ предприятия [8]. Исходя из определения модели как средства получения информации о полноте таких мер в качестве характеристики для оценки адекватности математической модели данного показателя воспользуемся одним из основополагающих понятий в теории информации [9] – понятием количества информации. Для этого рассмотрим количество информации, соответствующее структурному разнообразию функциональных состояний процессов, характерных для целевой функции мер контроля. С этой целью воспользуемся метрикой Хартли [10], относящейся к структурным методам определения количества информации [11].

В соответствии с обоснованием [8] математической (аналитической) моделью показателя полноты мер технического контроля эффективности защиты информации от утечки по каналам ПЭМИН является выражение:

$$Q = 1 - \left(1 - \frac{\log_2 S^{(\kappa)}}{\log_2 S^{(n)}}\right)^{\frac{\bar{\tau}_{(\kappa)}}{\bar{\tau}_{(1)}}}, \qquad (1)$$

где $S^{(\kappa)}$ – число функциональных состояний, реализуемых процедурами технического контроля эффективности защиты информации от утечки по каналам ПЭМИН;

$S^{(n)}$ – число функциональных состояний, реализуемых процедурами перехвата информативных сигналов ПЭМИН;

$\bar{\tau}_{(\kappa)}$ – среднее значение случайной величины времени реализации процедур технического контроля эффективности защиты информации от утечки по каналам ПЭМИН;

$\bar{\tau}_{(1)}$ – среднее значение случайной величины времени реализации процедур контроля одного признака угрозы перехвата информативных сигналов ПЭМИН.

Исходя из представления математической модели показателя полноты мер технического контроля эффективности защиты информации от утечки по каналам ПЭМИН в виде выражения (1), выражение для определения количества информации, получаемого в результате характеристики множества функций $S^{(n)}$, выполняемых в процессе перехвата информативных сигналов ПЭМИН, и множества функций $S^{(\kappa)}$, выполняемых в процессе реализации мер технического контроля эффективности защиты информации от утечки по каналам ПЭМИН, в соответствии с метрикой Хартли, представляется в виде [12,13]:

$$\Omega = log_2|S^{(n)}| + log_2|S^{(\kappa)}|. \qquad (2)$$

Выражение (2) позволяет количественно оценить адекватность математической модели (1) показателя полноты реализации мер технического контроля эффективности защиты информации от утечки по каналам ПЭМИН, как средства получения информации о процессах, характеризуемых данным показателем.

Как и в случае адекватности математических моделей защищенности информации для определения адекватности метода оценки исследуемых характеристик защищенности применима методология оценки количества информации [10]. В качестве примера определим адекватность метода оценки характеристик мер, направленных на предотвращение утечки информации по каналам ПЭМИН. В условиях доминирования фактора неопределенности, связанного со спецификой защиты информации от утечки по каналам ПЭМИН, в качестве метрики количества информации, получаемой в результате оценки характеристик мер, направленных на предотвращение утечки информации по каналам ПЭМИН, будем использовать энтропийную метрику количества информации Шеннона [14], относящуюся к классу статистических мер информации.

Пользуясь метрикой Шеннона в качестве меры количества информации, сообщаемого при оценке некоторой определенной характеристики $c_j \in C$, определим изменение разнообразия, возникающего при выборе конкретного элемента $c_j$ исходного множества $C$. В этом случае количество информации, сообщаемое при наступлении с вероятностью $p_j$ определенного числа событий

$$c_1, c_2, \ldots, c_j, \ldots, c_J, c_j \in C,$$

состоящих в оценке соответствующих характе-

ристик, определяется изменением степени неопределенности и равно:

$$A(C) = -\sum_{j=1}^{J} \rho_j \log_2 \rho_j . \quad (3)$$

В [12, 13] обосновано, что характеристики мер, направленных на предотвращение утечки информации по каналам ПЭМИН, системно представляются в виде упорядоченного (структурированного) множества:

$$C = c_{11} \cup c_{21} \cup \ldots \cup c_{n_1 1} \cup \cup c_{n_1+1,2} \cup c_{n_1+2,2} \cup \ldots \cup c_{n_2 2} \cup \cup c_{n_2+1,3} \cup c_{n_2+2,3} \cup \ldots \cup c_{n_3 3} \cup \ldots \cup c_{n_{L-1}+1,L} \cup c_{n_{L-1}+2,L} \cup \ldots \cup C_{NL} \quad (4)$$

где $c_{nl}$ – подмножество характеристик $l$-го, $l=1,2,\ldots,L$, уровня, структурированных по основанию $n$, $n=1,2,\ldots,N$;

$N$ – число оснований, по которым структурируются характеристики мер защиты информации от утечки по каналам ПЭМИН.

Исходя из изложенного, следует, что структура множества (4) характеристик мер защиты информации от утечки по каналам ПЭМИН формируется путем синтеза. При этом первый (нижний) уровень структуры представляется характеристиками функций, выполняемых в процессе реализации перехвата информативных сигналов ПЭМИН, и характеристиками функций, выполняемых в процессе защиты информации от такого рода угроз. Последующие уровни такой структуры формируются исходя из оснований, по которым структурируются исследуемые характеристики (в соответствии с (4) число таких оснований равно $N$). Ввиду того, что каждая отдельная характеристика второго уровня данной структуры, как характеристика, отражающая эффективность мер, направленных на предотвращение утечки информации по каналам ПЭМИН, образуется на основе определенных соотношений между характеристиками функций, выполняемыми в процессе перехвата информативных сигналов, и характеристиками функций, выполняемыми в процессе защиты информации от такого рода угроз, а характеристики каждого из элементов третьего и последующего уровней образуются на основе определенных соотношений между множествами характеристик предыдущих уровней, формируемая структура является иерархической, а ее элементы связаны между собой отношением «многие к одному». При этом процедура, реализующая процесс синтеза, является композиционной. В этих условиях очевидно, что последний композиционный уровень структуры характеристик представлен одной характеристикой ($L_N=1$), которую определим как показатель эффективности мер, направленных на предотвращение утечки информации по каналам ПЭМИН.

Исходя из равновероятного наступления событий, связанных с оценкой множества (4) характеристик исследуемых процессов, соответствующие выражению (3) вероятности определяются как:

$$\rho(c_{nl}) = \frac{1}{h_{nl}}, \quad (5)$$

где $h_{nl}$ – допустимое разрядностью оценочной шкалы число значений, которые может принимать характеристика $c_{nl}$.

С учетом (5) выражение (3) для множества (4) характеристик мер защиты информации от утечки по каналам ПЭМИН представляется в виде:

$$A(C) = h_{11}\cdot\log_2 h_{11} + h_{21}\cdot\log_2 h_{21} + \ldots + h_{n_1 1}\cdot\log_2 h_{n_1 1} + h_{n_1+1,2}\cdot\log_2 h_{n_1+1,2} + h_{n_1+2,2}\cdot\log_2 h_{n_1+2,2} + \ldots + h_{n_2 2}\cdot\log_2 h_{n_2 2} + h_{n_2+1,3}\cdot\log_2 h_{n_2+1,3} + h_{n_2+2,3}\cdot\log_2 h_{n_2+2,3} + \ldots + h_{n_3 3}\cdot\log_2 h_{n_3 3} + \ldots + h_{n_{L-1}+1,L}\cdot\log_2 h_{n_{L-1}+1,L} + h_{n_{L-1}+2,L}\cdot\log_2 h_{n_{L-1}+2,L} + \ldots + h_{NL}\cdot\log_2 h_{NL}. \quad (6)$$

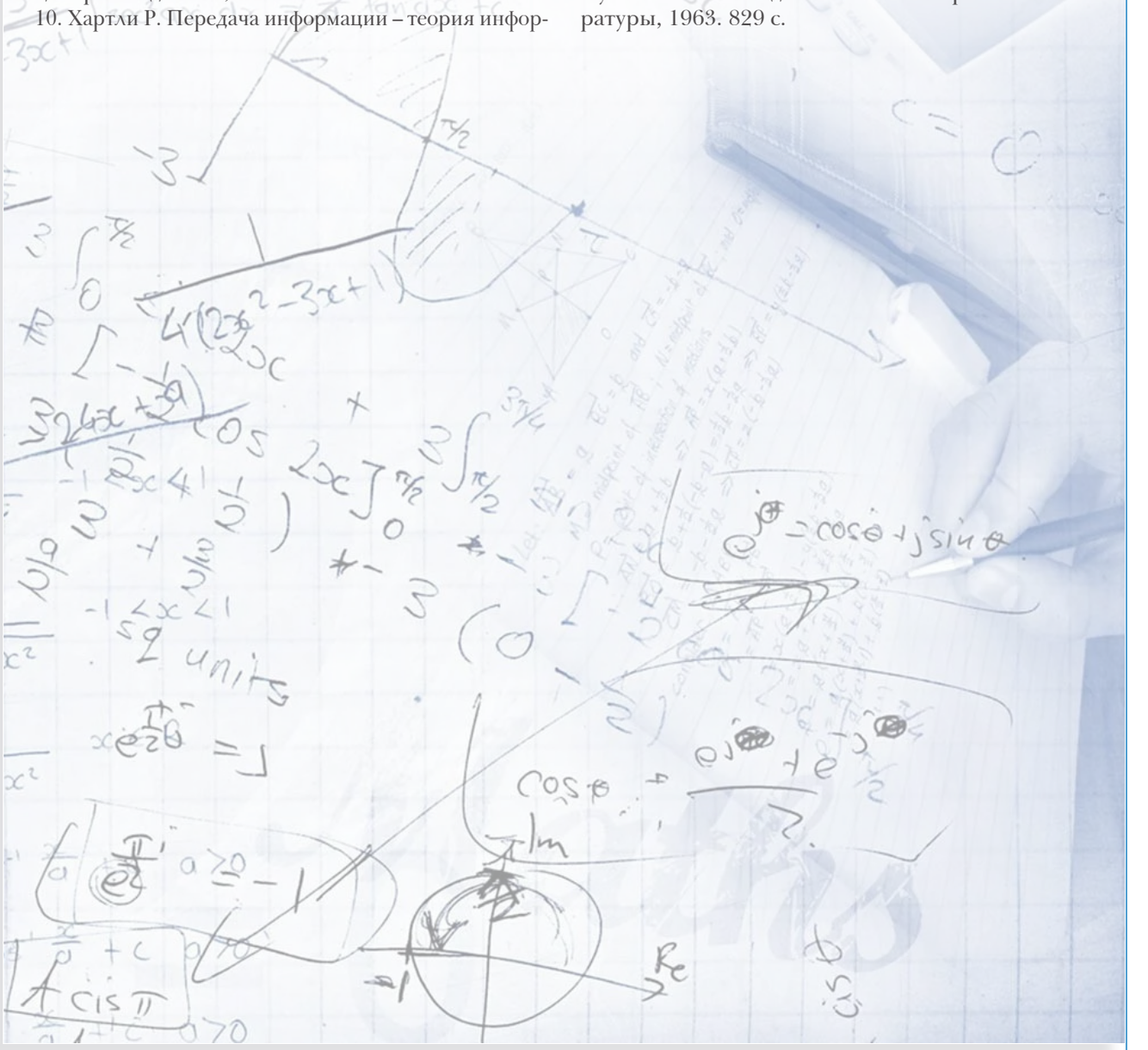
Выражение (6) отражает информативность оценочной шкалы, что позволяет использовать данное выражение в качестве характеристики адекватности методического аппарата оценки характеристик мер, направленных на предотвращение утечки информации по каналам ПЭМИН.

Очевидно, что рассмотренный на приведенных примерах методический подход, может быть распространен на значительное число приложений, касающихся адекватной оценки показателей эффективности защиты информации.

**Литература**

1. Федеральный закон от 26.07.2017 №187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации».
2. Уемов А.И. Аналогия в практике научного исследования. М.: Наука, 1970. 264 с.
3. Уемов А.И. Логические основы метода моделирования. М.: Мысль, 1971. 311 с.
4. ISO/IEC/IEEE 24765:2010 Systems and software engineering – Vocabulary IEEE Std 1233-1998 (R2002) IEEE Guide for Developing System Requirements Specifications.
5. Моделирование как системообразующий фактор при оценке защищенности информационных процессов в компьютерных системах / А.П. Курило, В.Н. Финько, В.С. Зарубин, А.Я. Фомин // Безопасность информационных технологий, 2010. №2. С.19-21.
6. Принципы моделирования информационных процессов в корпоративных компьютерных сетях / С.В. Скрыль, В.К. Джоган, В.Н. Финько,

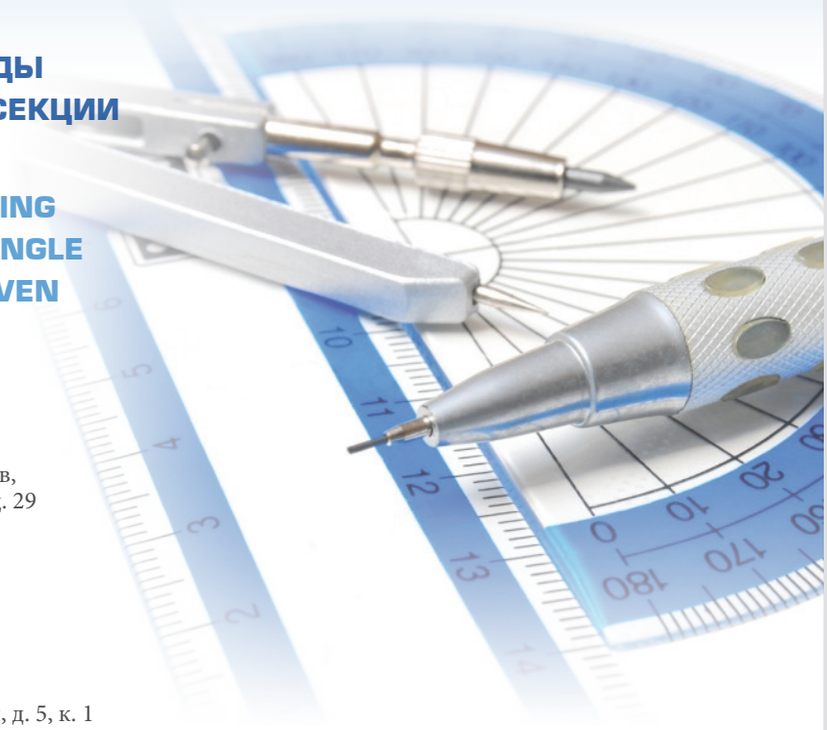
А.В. Мозговой // Интеллектуальные системы (INTELS' 2010): Труды Девятого международного симпозиума. М.: РУСАКИ, 2010. С.593-594.
7. Кубланов М.С. Проверка адекватности математических моделей // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. М.: МГТУ ГА, серия «Аэромеханика и прочность», 2015. №211. С.29-36.
8. Математическая модель полноты реализации функций защиты информации как инструмент научного обоснования мер обеспечения ее безопасности / С.В. Скрыль, Т.В. Мещерякова, В.В. Гайфулин, И.М. Тегенцев и др. // Промышленные АСУ и контроллеры, 2020. №5. С.42-52.
9. Теория информации: учебник / А.И. Куприянов и др.; под ред. С.В. Скрыля. М.: Издательский центр «Академия», 2021. 240 с.
10. Хартли Р. Передача информации – теория информации и ее приложения. М.: Прогресс, 1959. 312 с.
11. Бриллюэн Л. Наука и теория информации. Пер. с англ. А.А. Харкевича. М.: Гос. изд. физ.-мат. лит-ры, 1960. 391 с.
12. Основные теоретические положения методологии оценки характеристик мер обеспечения безопасности информации / В.В. Гайфулин, И.М. Тегенцев и др. // Авиакосмическое приборостроение, 2018. №8. С.46-53.
13. Теоретические основания для системного представления характеристик эффективности мер, направленных на предотвращение утечки информации по техническим каналам / И.М. Тегенцев, С.В. Скрыль, М.П. Сычев и др. // Телекоммуникации, 2019. №4. С.27-34.
14. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. Пер. с англ. Р.Л. Добрушина и О.В. Лупанова. М.: Издательство иностранной литературы, 1963. 829 с.



УДК 514.01

# СПОСОБ ПОСТРОЕНИЯ ХОРДЫ ИСКОМОГО УГЛА ПРИ ТРИСЕКЦИИ ЗАДАННОГО

# A METHOD FOR CONSTRUCTING A CHORD OF THE DESIRED ANGLE WITH A TRISECTION OF A GIVEN



Геннадий Николаевич Рассохин
*кандидат технических наук,*
*старший научный сотрудник*
старший научный сотрудник
4 ЦНИИ МО РФ
Адрес: 141091, Московская обл., г. Королёв,
мкр. Юбилейный, ул. М.К. Тихонравова, д. 29
Тел. +7 (495) 515-11-85
E-mail: shomova.val@yandex.ru

Сергей Евгеньевич Кондаков
*кандидат технических наук*
доцент кафедры «Защита информации»
ФГБОУВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»
Адрес: 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, к. 1
Тел.+7 (499) 263-63-91
E-mail: sergeikondakov@list.ru

**Аннотация**
Предложен способ решения классической задачи трисекции любого угла (до 360° включительно) на основе определения хорды искомого угла.
**Ключевые слова:** угол, дуга, перпендикуляр, треугольник, окружность, радиус, хорда, прямая, биссектриса, засечка.

**Summary**
The classical problem to trisection of angle right up to 360° was solved by mechanical mode, based on construction the chord to the sought for the angle.
**Keywords:** angle, arc, perpendicular, triangle, circle, radius, chord, straight, bi sector, mark.

## Введение

Деление произвольного угла на три равные части при помощи циркуля и линейки без каких-либо делений и меток является одной из древнейших задач и относится к неразрешимым [1]. Однако известны некоторые способы трисекции угла – способы Архимеда, полосок, подвижных углов [2], «Т»-образной фигуры [3] и т.п. В настоящей статье предложен новый способ решения задачи деления любого заданного угла на три равных. Принимая во внимание, что предлагаемый способ базируется на решении деления угла, не превышающего ∠180°, опубликованном в [4], для полноты, наглядности и доказательства изложения будут использованы необходимые материалы из указанной публикации.

## Построение

Будем полагать, что самый большой (для наглядности) угол, который может быть построен (задан), составляет 360°. На *рисунке 1* задан угол 180°<∠O<360°, подлежащий трисекции. Заметим, что все рисунки в статье выполнены в едином масштабе. Из вершины угла ∠O на *рисунке 2* циркулем проведем окружность, пересекающую стороны заданного угла в точках A и Z. Из полученных точек циркулем сделаем засечки в точке N и, проведя биссектрису OC заданного угла ∠AOZ на *рисунке 2*, получим два равных угла ∠AOB и ∠BOZ, из которых каждый меньше 180°.

Из этого следует, что для трисекции каждого из указанных углов может быть применен подход, изложенный в [4]. В качестве примера комментарий построения будет проведен для угла ∠AOB.

Предлагаемый способ определения хорды искомого угла при трисекции угла ∠AOB будет проиллюстрирован на *рисунке 3*.

На рисунке проведем биссектрису угла ∠AOB (далее угол $\alpha$), для чего из концов его лучей A и B циркулем сделаем засечки, получив точку K, и

соединяя ее при помощи линейки с вершиной O угла $\alpha$, проведем прямую линию $n$. На прямой n из вершины угла циркулем раствором, равным OA (R), последовательно отметив точки L и $O_1$, получим равные радиусу R отрезки OL и $LO_1$. Через точку L проведем прямую $m$, перпендикулярную прямой n. Для этого из точек O и $O_1$ на прямой $n$ при помощи циркуля сделаем засечки и получим на их пересечении точки F и $F_1$. Через полученные точки по линейке проведем прямую $m$, которая по построению является касательной к окружности в точке L.

Соединяя поочередно линейкой точки A и B (концы лучей угла $\alpha$) с точкой $O_1$, проводим прямые, получая на пересечении с прямой $m$ точки D и C. Полученный отрезок DC является хордой угла, равного трети угла $\alpha$.

Сформулируем и докажем теорему: хорда угла, равного трети заданного центрального угла не более 180°, равна отрезку на касательной к окружности между точками пересечения прямых, соединяющих концы лучей заданного угла с точкой на дополнительной полупрямой, являющейся продолжением биссектрисы заданного угла, на расстоянии радиуса от точки касания.

**Доказательство**

На *рисунке 4* раствором циркуля отрезок DC (*рисунок 3*) перенесем в виде хорд $AD_1$ и $C_1B$ на окружность от концов лучей OA и OB центрального угла ∠AOB. Введем следующие обозначения: углы с равными по построению хордами $AD_1$ и $C_1B$ обозначим через ∠X, а угол $D_1OC_1$ как ∠Y.

Доказательство того, что ∠Y=∠X будет свиде-

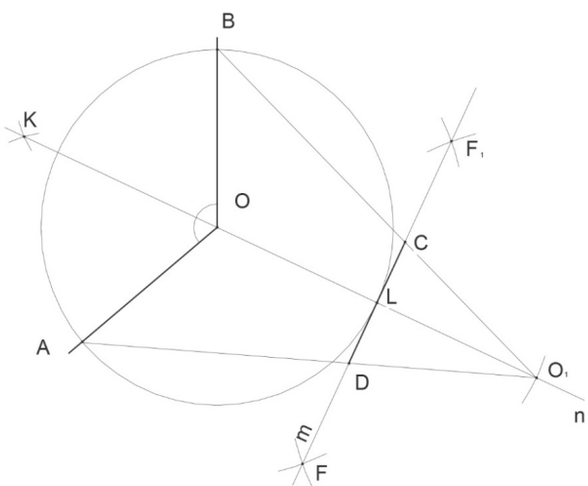



**Рис. 3.** Трисекция угла AOB (построение)

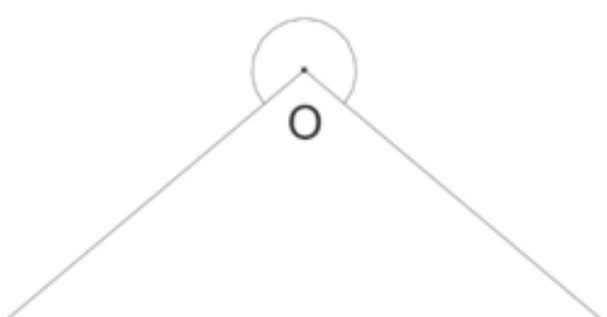



**Рис. 1.** Угол O, подлежащий трисекции

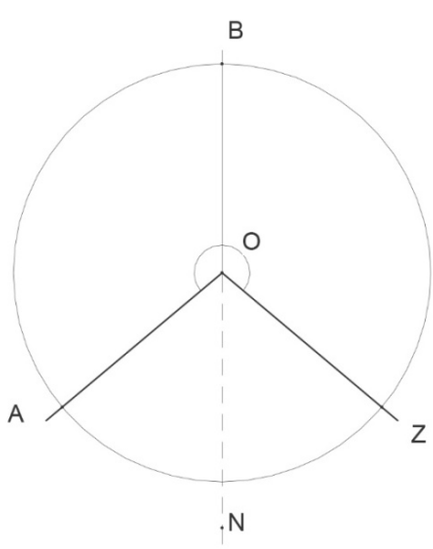



**Рис. 2.** Углы ∠AOB и ∠BOZ, равные по построению.

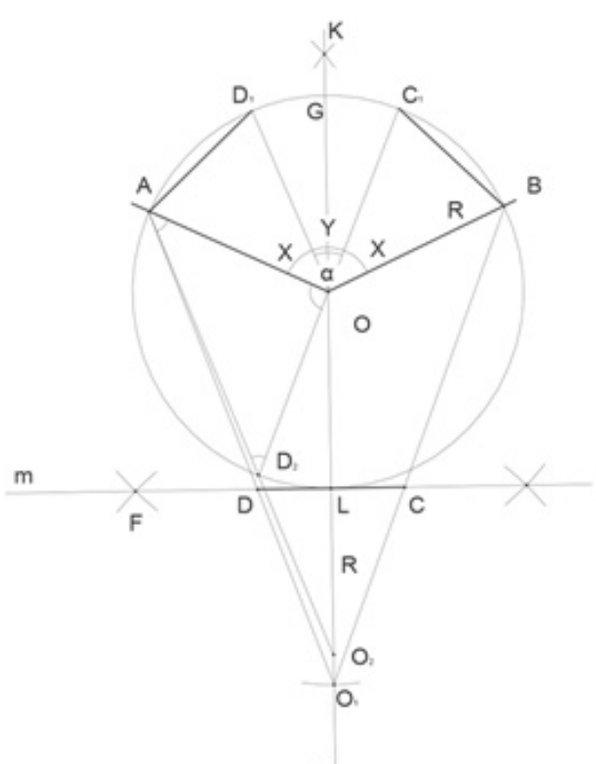



**Рис. 4.** Трисекция угла AOB (доказательство)

тельством, что задача трисекции угла α решена.

Соединив линейкой точки $C_1$ и O на луче угла $D_1OC_1$, продолжим прямую до пересечения с окружностью в точке $D_2$. Построим треугольник $AOD_2$, соединив линейкой точки A и $D_2$ и проведя прямую. Этот треугольник равнобедренный, так как стороны AO и $OD_2$ равны радиусу R окружности с центром в точке O и, следовательно, равны между собой.

Определим углы в этом треугольнике. Примем во внимание, что $\angle D_2OC_1$ является развернутым углом и равен 180°. Отсюда $\angle AOD_2=180°-\angle AOC_1$, но $\angle AOC_1=\angle X+\angle Y$. Отсюда $\angle AOD_2=180°-(\angle X+\angle Y)$. Рассматривая треугольник $AOD_2$, заметим, что углы $D_2AO$ и $AD_2O$ равны, как углы при основании в равнобедренном треугольнике, и каждый из них равен $(\angle X+\angle Y)/2$. Это следует из того, что $\angle AD_2O=(180°—180°+\angle X+\angle Y)/2$. Обратим внимание на то, что $\angle AOC_1$ является внешним углом треугольника $AOD_2$ при вершине O и равен сумме углов $AD_2O$ и $D_2AO$. Таким образом, приходим к выводу, что, с одной стороны $\angle AD_2O=\angle X=(\angle X+\angle Y)/2$, а, с другой стороны $\angle D_2AO=\angle Y=(\angle X+\angle Y)/2$. Раскрывая равенства, получаем $2\angle Y=\angle X+\angle Y$ и $2\angle X=\angle X+\angle Y$, из чего следует, что $\angle X$ и $\angle Y$ равны.

Таким образом, доказано равенство углов X и Y, а, следовательно, и правомерность предложенного способа трисекции угла $\angle AOB<180°$.

Возвращаясь к заданному углу $180°<\angle AOZ<360°$ на *рисунке 2*, констатируем, что результаты трисекции углов $\angle AOB$ и $\angle BOZ$ должны быть адекватными (в данном случае равными), исходя из равенства исходных углов. С *рисунка 2* на *рисунок 5* перенесем окружность с заданным углом $\angle AOZ$ и биссектрисой OB и раствором циркуля, равным хорде DC, сделаем засечки на окружности вписанного в нее заданного угла $\angle AOZ$ (с учетом трех хорд на каждую половину угла в соответствии с трисекцией).

В левой половине ($\angle AOB$) заданного угла ($\angle AOZ$) хорды обозначим с учетом их построения на *рисунке 4*: $AD_1$, $D_1C_1$ и $C_1B$, в правой части заданного угла – как $BC_2$, $C_2D_2$ и $D_2Z$. Соединив концы отложенных хорд с центром O (вершиной) $\angle AOZ$, получим шесть центральных углов: $\angle AOD_1$, $\angle D_1OC_1$, $\angle C_1OB$ и $\angle BOC_2$, $\angle C_2OD_2$, $\angle D_2OZ$, которые равны, так как равны их хорды. Объединим попарно равные углы хордами $AC_1$, $C_1C_2$ и $C_2Z$, которые равны по построению. Перенесем результаты построений на *рисунок 6*.

Зафиксируем циркулем длину трех равных хорд $AC_1$, $C_1C_2$, $C_2Z$ спаренных углов, сделаем засечки на окружности с центром O, в которую был вписан заданный $\angle AOZ$ и по линейке соединим их с центром O. В результате получаем заданный угол $\angle AOZ$, разделенный на три равных угла: $\angle AOC_1$, $\angle C_1OC_2$ и $\angle C_2OZ$.

Таким образом, задача трисекции угла, большего 180°, но меньшего или равного 360°, может быть решена с применением способа, предложенного в [4]. Ниже на основании изложенного приводится алгоритм трисекции угла в этом случае.

**Алгоритм трисекции угла большего 180°**

1. Задается угол, больший 180° и меньший (или равный) 360°.

2. Описывается окружность вокруг угла с центром в его вершине.

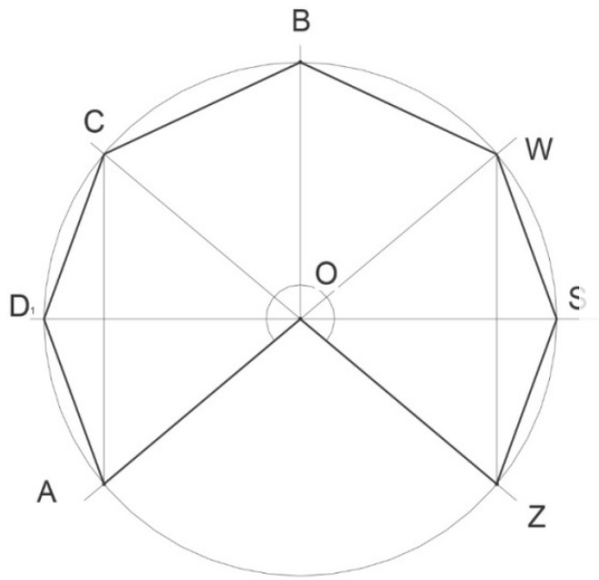



**Рис. 5.** Построение хорд равных хорде DC, углов, полученных при трисекции углов $\angle AOB$ и $\angle BOZ$

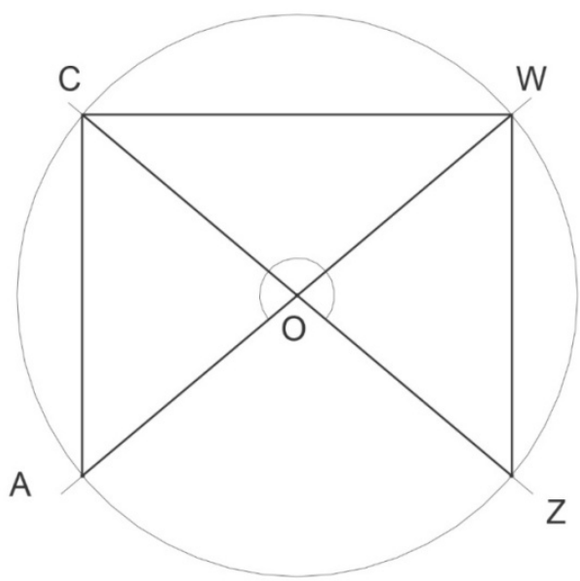



**Рис. 6.** Углы $AOC_1$, $C_1OC_2$, $C_2OZ$, построенные по их хордам

3. Проводится биссектриса угла, деля заданный угол на два равных.

4. Для одного (рассматриваемого) из равных углов из его вершины проводится биссектриса.

5. На продолжении биссектрисы в противоположную сторону от угла из точки пересечения с окружностью циркулем делается засечка на расстоянии, равном радиусу окружности (или из центра окружности на расстоянии двух радиусов).

6. Точка пересечения продолжения биссектрисы с засечкой соединяется с концами лучей рассматриваемого угла.

7. Через точку пересечения продолжения биссектрисы с окружностью проводится касательная к окружности.

8. Отрезок на касательной между точками пересечения с прямыми, соединяющими концы лучей рассматриваемого угла, равен хорде угла, составляющего его треть.

9. Из концов лучей рассматриваемого угла делаем на окружности циркулем засечки на расстоянии одна от другой, равном полученной хорде. Соединяем засечки между собой и с центром окружности, и получаем три равных по построению угла (равным хордам соответствуют и равные углы).

10. По аналогии действия с п.4 по п.9 повторяем на части окружности, ограничивающей вторую половину исходного угла и получаем также три равных угла по построению.

11. Объединим попарно полученные равные углы и соединим концы их лучей на окружности хордами. Эти три новые хорды равны между собой по построению и принадлежат трем соответственно равным углам.

12. Полученные хорды, соответствующие попарно равным углам, циркулем отложим на окружности от концов лучей заданного угла. Соединив концы отложенных хорд с центром, получаем три равных искомых угла.

13. Таким образом, решается задача трисекции любого угла до 360° включительно.

**Литература**

1. История математики. Под ред. А.П. Юшкевича. М.: Наука, 1970. Т.1. С древнейших времен до начала нового времени. 352 с.

2. Прасолов В.В. Три классических задачи на построение. М.: Наука, 1992. 80 с.

3. Голиков В.П. Механический способ решения задачи трисекции угла // Двойные технологии, 2011, №2. С.32-35.

4. Рассохин Г.Н. Механический способ решения задачи о трисекции угла на основе определения хорды искомого угла. Теоретические вопросы физики: Сборник трудов СИП РИА. Вып.24. М.: Издательство «ПСТМ», 2015.

УДК 621.3.049.77

# РАЗРАБОТКА РЕКОНФИГУРИРУЕМОЙ СТРУКТУРЫ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

# DEVELOPMENT OF RECONFIGURABLE STRUCTURE OF HIGH-LOAD COMPUTING SYSTEMS

Дмитрий Владимирович Крахмалёв
*кандидат технических наук, доцент*
доцент департамента «Бизнес-информатика»
Финансовый университет при правительстве РФ
Адрес: 125167, Москва, Ленинградский пр-т, д. 49/2
Тел.: +7 (968) 879-43-95
E-mail: DKrakhmalev@fa.ru

Лев Николаевич Демидов
*кандидат технических наук, доцент*
доцент департамента «Бизнес-информатика»
Финансовый университет при правительстве РФ
125167, Москва, Ленинградский пр-т, д. 49/2
E-mail: LDemidov@fa.ru

Владимир Петрович Данилов
*кандидат технических наук, доцент*
заведующий кафедрой
«Информационные системы и технологии»
Учебный центр «Интеграция» МАИ
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Октябрьская, д. 21
Тел.: +7 (915) 352-08-62
E-mail: danmai7@yandex.ru

**Аннотация**

В статье рассмотрены вопросы построения системы комплексирования мажоритарно-резервированных комплексов в высоконагруженных вычислительных системах на основе резервированных интерфейсов, в том числе разработки реконфигурируемой структуры и архитектуры высоконагруженной вычислительной системы – ВВС, использование в качестве основной ячейки построения ВВС мажоритарно-резервированного комплекса с тройным резервированием. Целью проводимого исследования является повышение живучести вычислительных систем при требуемом уровне быстродействия. Для достижения поставленной цели решена задача синтеза структурных и архитектурных вариантов построения функциональных элементов таких систем.

**Ключевые слова:** высоконагруженные вычислительные системы, мажоритарные элементы, комплексирование, резервирование, интерфейсы.

**Summary**

The article deals with the issues of building a system of integration of majority-reserved complexes in high-load computing systems based on redundant interfaces, including the development of the structure and architecture of a high-load computing system – HLCS, the use of a majority-reserved complex with triple high-load computing system – HLCS. The purpose of the research is to increase the survivability of computing system at the required level of performance. To achieve this goal, the problem of synthesis of structural and architectural variants of the construction of functional elements of such systems has been solved.

**Keywords:** high-load computing systems, majority elements, aggregation, redundancy, interfaces.

## Введение

Анализ существующих структур, применяемых при разработке высоконагруженных вычислительных систем (ВВС), с использованием интенсивных и экстенсивных методов построения показал, что эти методы не обеспечивают требуемый уровень живучести [1].

Накопленный авторами опыт разработки специальных вычислительных комплексов с большой наработкой на отказ (порядка 100000 часов) позволил предложить решение задачи, в основе которой лежит новый метод выбора структуры и архитектуры ВВС.

С целью повышения живучести при требуемом быстродействии ВВС, в работе рассмотрены вопросы:

- разработки структуры и архитектуры реконфигурируемой ВВС;
- использования в качестве основной ячейки построения ВВС – мажоритарно-резервированного комплекса;
- упрощения схемы модулей комплексирования функциональных частей ВВС;
- использования в качестве основного коммутационного оборудования мажоритарных элементов комплектов;
- применения в модулях комплексирования ячеек ВВС интерфейсов, как широких, так и уз-

ких, в основном с разделенными магистралями источников и приемников информации;

- расположения стоек ВВС внутри ячеек, а также самих ячеек в ВВС.

**Разработка система комплексирования**

Требования к надежности, живучести и наращиваемости вычислительных систем, в дальнейшем – ВС, наиболее точно были сформулированы А.В. Каляевым в монографии «Многопроцессорные системы с программируемой архитектурой» [5]. При этом особо подчеркивалось о необходимости обеспечения эффективной системы переключения различных функциональных частей ВС, что невозможно сделать без гибкой мощной коммутации и без возможности программирования архитектуры ВС.

Повысить надежность ВС можно в результате использования при ее конструировании минимального числа различных типов функциональных частей, в дальнейшем – ФЧ, регулярность соединений последних и самовосстанавливаемость каналов связи.

Этим условиям удовлетворяет многопроцессорная система, состоящая из однотипных ФЧ, имеющая возможность перестраивать и автоматически восстанавливать архитектуру ВС.

Надежность может быть также повышена за счет использования методов мажорирования. В многопроцессорных системах, обладающих программируемой коммутацией, эти методы позволяют повышать надежность программным путем за счет резервирования работы наиболее ответственных ФЧ.

В ходе исследования авторами в качестве основного элемента системы предложена схема тройного мажоритарного резервирования комплектов [2]. При этом рассмотрена работа резервированных комплектов в режимах резервирования 1001, 1002, 1003, 2002, 2003. Решены вопросы синхронизации работы мажоритарно-резервированных комплектов, в том числе с учетом времени перекоса сигналов между комплектами [3]. Показана возможность наращивания архитектуры системы за счет однородности ее построения.

Перестройка архитектуры системы производится за счет перепрограммирования схемы управления мажоритарными элементами в каждом из резервированных комплектов в соответствии с программно-задаваемыми признаками резервирования.

В общем виде структурная схема сегмента ВС представлена на *рисунке 1*. ВС представляет собой ячеистую сотовую структуру, основным элементом каждой ячейки которой являются три программно-управляемых комплекта, связанных между собой межкомплектными связями, обеспечивающими доступ к мажоритарным элементам одноименных сигналов соседних комплектов.

На *рисунке 2* изображена схема системы комплексирования комплектов одной ячейки, где А, Б, В – это резервированные комплекты ячейки;

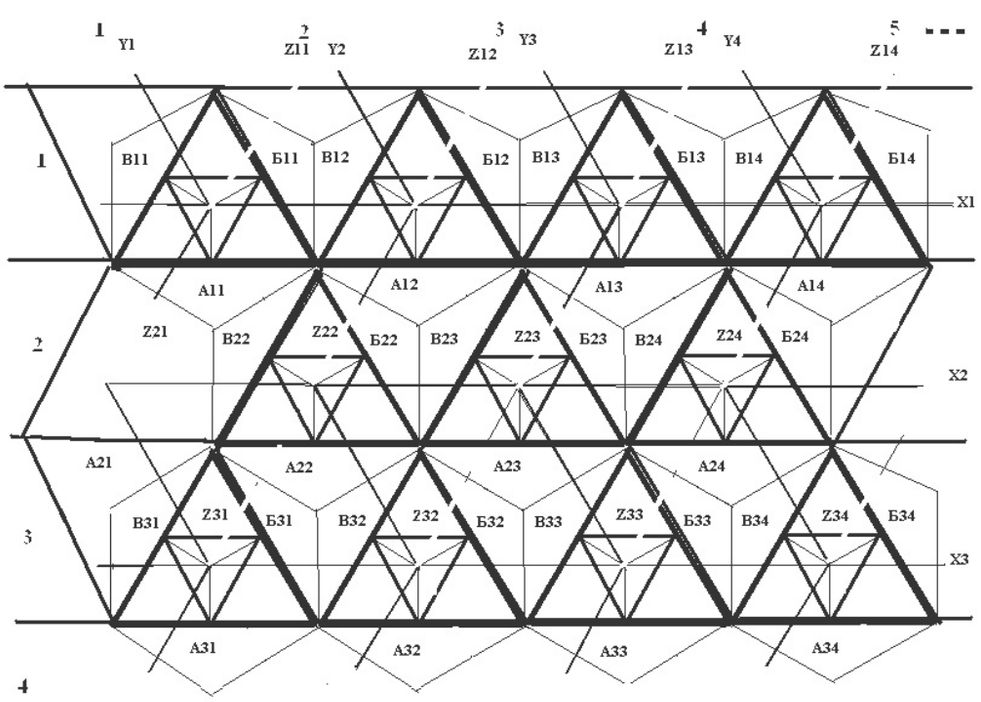



**Рис. 1.** Структурная схема сегмента вычислительной системы

МСИ-А, МСИ-Б, МСИ-В – магистрали системных интерфейсов комплектов А, Б, В соответственно. В качестве исходных данных для схем резервирования введены следующие обозначения:

1) С – сигнал своего комплекта;
2) Л – сигнал левого комплекта;
3) П – сигнал правого комплекта.

При этом для комплектов А, Б, В в качестве своего, левого и правого будут комплекты:

1) для комплекта А: свой – А, левый – В, правый – Б;
2) для комплекта Б: свой – Б, левый – А, правый – В;
3) для комплекта В: свой – В, левый – Б, правый – А.

Очевидно, что если комплекты одной ячейки расположить относительно друг друга как показано на *рисунке 2*, возникает проблема синхронизации в работе комплектов из-за разницы в длине межкомплектных связей между ближними и дальними комплектами, а значит и в разнице времен распространения сигналов между ними. На *рисунке 1* эта проблема устранена за счет расположения резервированных комплектов по сторонам равностороннего треугольника, например А11, Б11, В11, межкомплектные связи в этом случае имеют одинаковую длину между соседними комплектами.

Проблемы синхронизации работы в микропроцессорных структурах подробно рассмотрены в работе [6], в том числе применительно к системам с тройным мажоритарным резервированием – в работах [3,4].

В работе [2] рассмотрена работа мажоритарно-резервированного дублированном – 1002, 2002, повторительном – 1001,1002.1003. В частности, обеспечение работы в этих режимах мажоритарных элементов, стало возможным из-за введения признаков резервирования в схемы формирования сигналов управления мажоритарными элементами. Введение признаков резервирования также позволяет комплектам любой ячейки работать независимо друг от друга, что в свою очередь позволяет создать гибкий механизм реконфигурирования ВС в процессе работы. При этом упрощается схема комплексирования функциональными частями ВС. Мажоритарные элементы периферийного оборудования могут выполнять функции коммутаторов ВС.

На *рисунке 3* представлена структурная схема одной ячейки комплекса, где А, Б и В являются задатчиками магистралей источников и приемников информации соответствующих комплектов. Авторы предлагают с целью повышения быстродействия в схемах процессоров вводить отдельно

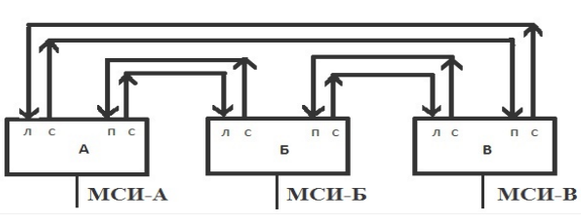



**Рис. 2.** Схема системы комплексирования комплектов одной ячейки

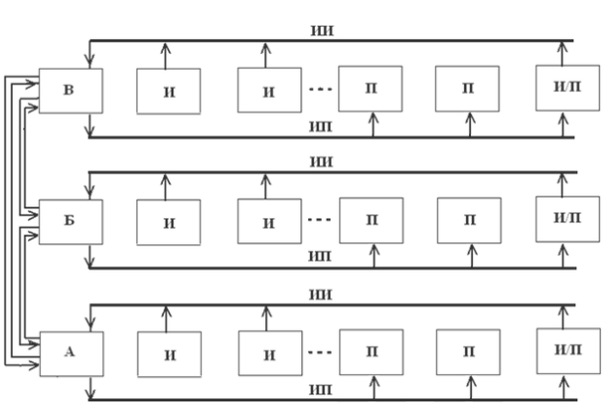



**Рис. 3.** Структурная схема одной ячейки комплекса

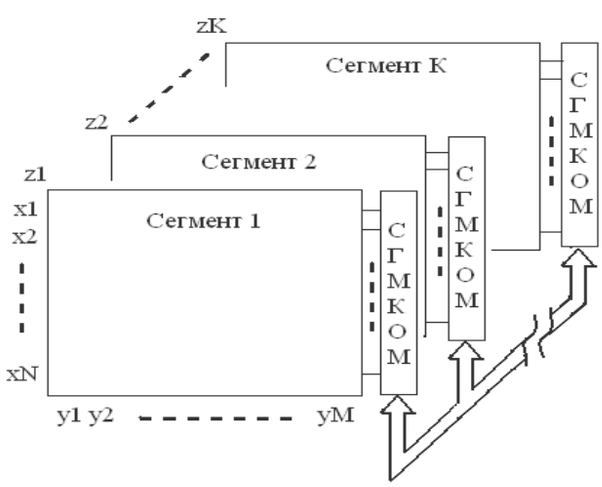



**Рис. 4.** Структурная схема комплексирования сегментов ВС

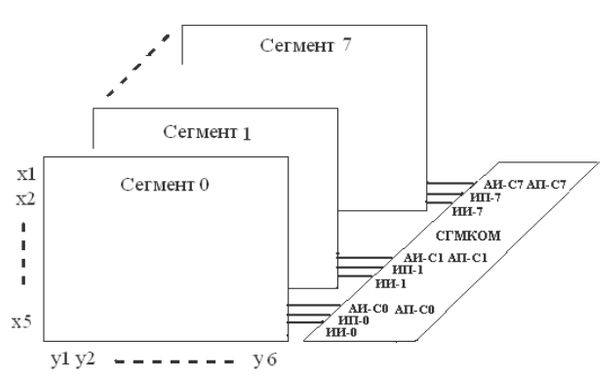



**Рис. 5.** Структура одного сегмента при организации матрицы 6*5

интерфейсы источников информации (ИИ) и интерфейсы приемников (ИП) информации.

Задачи разработки имитационной модели функционирования элементов ВВС при ее реконфигурировании в различных режимах резервирования, а также анализ эффективности функционирования телекоммуникационной сети, соответствующей ВС, представленной на *рисунке 1*, упрощается из-за соблюдения условий мультифрактального характера трафика.

В ходе разработки ВС авторы придерживались соблюдения условий самоподобия, характерных для топологии фрактальных структур.

На *рисунке 4*. представлена структурная схема комплексирования ВС, где СГМКОМ – сегментаторы-коммутаторы ВС.

Связь между отдельными ячейками сегментов комплекса и между сегментами ВС осуществляется по координатам X, Y, Z. В качестве проводящей среды каналов связи предлагается использовать оптические или любые другие проводные линии связи. Предпочтение авторы отдают каналам связи цифровых групповых трактов приема-передачи. Сегментаторы обеспечивают полнодоступную схему связи между всеми функциональными частями ВС. Рассмотрим пример такого применения.

В качестве ячейки ВС будем использовать мажоритарно-резервированный комплекс, рассмотренный выше. На *рисунке 5* приведена структура одного сегмента при организации матрицы 6*5. Связи между ячейками показаны сплошной линией.

Каждому комплексу ячейки сегмента соответствует канальный интервал потока. Для организации передачи данных между ячейками используем три взаимосвязанных потока: данные интерфейса источников информации, данные интерфейса приемников информации, адреса источников/приемников информации. Для передачи адресов источников и приемников информации предлагается использовать один поток. При этом, номера канальных интервалов потоков соответствуют номерам ячеек одного сегмента ВС. Содержимое канальных интервалов адресного потока представляет собой двоичный код адреса приемника информации, который состоит из адреса потока информации сегмента (три старших разряда) и адреса соответствующего ему канального интервала приемника информации (пять младших разрядов). Поток адресов источников/приемников информации необходим для формирования содержимого адресного запоминающего устройства СГМКОМ. Адрес приемника информации, в том числе номер сегмента и номер его канального интервала, формирует сам источник информации, записывая его в канальный интервал, номер которого соответствует номеру канального интервала источника соответствующего сегмента. Номер сегмента источника СГМКОМ определяет по номеру адресного потока. На *рисунке 6* приведена структурная схема организации потоков рассматриваемой ВС, где АП-Ci – адреса приемников информации потока *i*-го сегмента; АИ-Ci – адреса источников потока *i*-го сегмента; ИИ-i – данные интерфейса источника потока *i*-го сегмента; ИП-i – данные интерфейса приемника потока *i*-го сегмента; МХ – мультиплексоры; ЗУ-А – запоминающее устройство адресов сегментов и канальных интервалов источников информации; ЗУ-Д – запоминающее устройство данных сегментов и канальных интервалов источников информации; Д1/Д0 – вход/выход запоминающих устройств; А – адреса ячеек ЗУ-А, ЗУ-Д. На *рисунке 6* не показаны цепи управления и синхронизации работы СГМКОМ.

В ЗУ-А адрес ячейки соответствует адресу приемника информации, в том числе адрес сегмента и номер канального интервала адресного потока, а в ЗУ-Д соответственно источника информации. В ЗУ-А данные ячейки соответствуют адресам источника информации для соответствующего адреса приемника. В ЗУ-Д данные ячейки соответствуют данным канальных интервалов интерфейса источника. Использование концепции время-импульсного уплотнения позволит производить обмен информацией между абонентами ВС по полнодоступной схеме. В потоках ИИ и ИП может передаваться информация любого вида, в том числе например:

1) запросы на осуществление доступа источника в тому или иному приемнику;

2) выбор протокола обмена между источником и приемником;

3) перераспределение канальных интервалов между абонентами ВС;

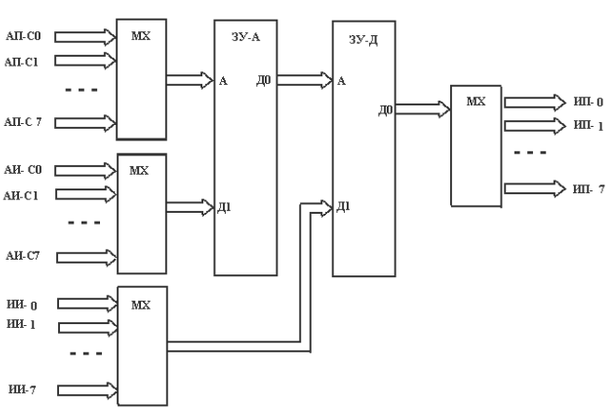



**Рис. 6.** Структурная схема организации потоков СГМКОМ рассматриваемой ВС

4) адреса источников и приемников данных;
5) коды функций, команды или состояния;
6) суб-адреса;
7) указатели параметров обмена, в том числе длины передаваемого пакета данных;
8) собственно данные;
9) рамки кадра или защитная информация;
10) и т. п.

**Заключение**

С целью повышения живучести при требуемом быстродействии ВВС, в работе рассмотрены вопросы разработки структуры и архитектуры высоконагруженных вычислительных систем. Приведена постановка задачи разработки имитационной модели функционирования элементов ВВС при ее реконфигурировании в различных режимах резервирования.

**Литература**

1. Мельников А.К. Исследование путей модернизации реконфигурируемых вычислительных систем // Известия ЮФУ. Технические науки, 2014. Вып.12 . С.83-89.
2. Ксенофонтов А.С. Повышение живучести мажоритарно-резервированных систем управления / Ксенофонтов А.С., Сыцевич Н.Ф., Кулиев Р.С., Сыцевич С.Н. // Известия КБНЦ РАН, 2015.№6(68 ). Т.II. С.100-104.
3. Сыцевич Н.Ф. Синхронизация работы мажоритарных элементов резервированных комплектов систем управления / Сыцевич Н.Ф., Кулиев Р.С., Москаленко Л.А., Молов М.З. // Современные наукоемкие технологии, 2016. №8(2). С.261-264.
4. Сыцевич Н.Ф. Мажоритирование сигналов с допустимым уровнем рассогласования в мажоритарно-резервированных системах / Сыцевич Н.Ф., Кулиев Р.С., Крахмалев Д.В, Жабоев Ж.Ж. // Современные наукоемкие технологии, 2017. №5. С.73-77.
5. Каляев А.В. Многопроцессорные системы с программируемой архитектурой. М.: Радио и связь, 1984. 240 с.
6. Сухман С.М., Бернов А.В., Шевкопляс Б.В. Синхронизация в телекоммуникационных системах. Анализ инженерных решений. М.: Эко-Трендз, 2003. 272 с.

УДК 629.735.33

# МЕТОДИКА И ПРОГРАММА ПРОЕКТНОГО АНАЛИЗА И ОПТИМИЗАЦИИ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ КРЫЛЬЕВОГО ТИПА

# METHOD AND PROGRAM OF DESIGN ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF WING–TYPE AIRCRAFT STRUCTURES

Валентин Владимирович Васильев
*кандидат технических наук, доцент*
МАИ (национальный исследовательский университет)
Адрес: 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4
Тел.: +7 (495) 556-90-11

Андрей Владимирович Крекнин
студент
филиал МАИ «Стрела»
Адрес: 140181, Московская обл., г. Жуковский, ул. Жуковского, д. 8
E-mail: andr.kreknin@gmail.com

**Аннотация**

Целью данной работы является создание методики формирования конструктивно-силовых схем тонкостенных авиационных конструкций, базирующейся на классических аналитических зависимостях строительной механики, соединенной с авторским алгоритмом поиска оптимальных решений, реализованной в программе формирования характерных сечений и облика всей конструкции. Приведены результаты проектировочных расчетов и весовой оптимизации конструкции (на примере стенок нервюр и центроплана среднемагистрального самолета).

**Ключевые слова:** крыльевая конструкция, стенка нервюры, панель крыла, лонжерон крыла, центроплан крыла, потеря устойчивости, весовая оптимизация, программа проектного анализа.

**Summary**

The purpose of this work is to develop a thin-walled wing-type structure generation method based on the classical analytical dependencies of structural mechanics, combined with the original optimal solutions search algorithm and realised into a program of a cross-section and appearance generation of the entire structure. There are results of structural design analysis and weight optimization (on the example of medium-range aircraft wing rib walls and a center-section box) presented.

**Keywords:** wing-type structure, rib wall, wing panel, wing longeron, wing central-section box, buckling, weight optimization, program of design analysis.

Широкое распространение программных комплексов конечно-элементного моделирования привело к повсеместному снижению роли аналитических методов при разработке конструкций авиационной техники [1,2]. При этом использование при анализе численного моделирования и осмысления полученных результатов является отдельной сложной задачей, требующей высокой квалификации, опыта, больших временных затрат и, поэтому, целесообразно только на конечных стадиях проектно-конструкторских работ.

На этом фоне потребность в относительно простых методиках проектно-конструкторских работ на стадии предварительного проектирования не только не исчезла, а наоборот, становится все более актуальной. Особенно явно такая необходимость существует при проектировании тонкостенных крыльевых конструкций, состоящих, в расчетном плане, из подкрепленных пластин (панелей). Их весовая эффективность и работоспособность в большой степени связаны с потерей устойчивости элементов конструкции, не поддающаяся прямому проектному расчету [3,5].

Предлагаемая методика проектного анализа и оптимизации конструкций крыльевого типа реализована в комплексе программ, написанных в среде MS Visual Basic, ориентированном на итерационное определение параметров и оптимизацию нагруженных продольными и сдвигающими нагрузками сжатых/растянутых панелей, а также составленных из них конструкций. Это конструкции типа кессона моноблочного крыла и центроплана, включающие панели обшивок и стенки лонжеронов и нервюр. Программа позволяет также оптимизировать конструктивно-силовые схемы (КСС) отдельных элементов конструкции, выбирая количество и размеры оребрения с учетом технологических ограничений [5,7].

Существует множество вариантов панелей крыла и центроплана, стенок нервюр, лонжеронов. Но по своей сути это всегда конструкция

из двух элементов – самой панели или стенки, а также подкрепляющих ее ребер жесткости (стрингеров). В основу алгоритма их расчета и оптимизации КСС положены следующие условия и допущения.

В случае стенки ее КСС – это система «клеток», образованных вертикальными $n$ и горизонтальными $p$ ребрами ($a$ – больший размер «ячейки», $b$ – меньший), работающая на сдвиг от касательных усилий $q_{сдв}$ (*рисунок 1*). Смысл такой конструкции – деление контура на мелкие ячейки для повышения критических напряжений $\tau_{кр}$ стенки при сдвиге [3].

В основу большей части исследований подобных конструкций с точки зрения минимальной массы обычно закладывается выбор некоторого критерия оценки. Это может быть как критерий Х. Вагнера, так называемый «коэффициент напряженности конструкции» [8], так и критерий В.И. Абрамова [6], или же «критерий подобия при сдвиге» [9]:

$$K_Q = \frac{Q}{(h^2 \cdot E)} = \frac{q_{сдв}}{b \cdot E}$$

Тогда толщина стенки $\delta_{ст}$ в упругой зоне работы конструкции $\tau_д \le \tau_{кр} \le \tau_{0,2}$, выраженная через критерий подобия [9]:

$$\delta_{ст} = \sqrt[3]{\frac{K_Q}{k/\eta_{сдв}}} \cdot b \text{ при } K_Q \le \sqrt{\left(\frac{\tau_{0,2}}{E}\right)^3 \frac{1}{k\eta_{сдв}}} = K_{Q\,max}$$

Высота ребра жесткости $h_р$ и его толщина $\delta_р$ определяется из соображений местной прочности и технологии изготовления плит-полуфабрикатов подобных панелей [4]. Критические напряжения сдвига, под действием которых происходит потеря устойчивости стенки, в данном алгоритме определяются по Эйлеру [3]:

$$\tau_{кр} = \frac{0{,}9Ek}{\sqrt{\left(\frac{b}{\delta_{ст}}\right)}},\ \tau^*_{кр} = \tau_{0,2}\frac{1+\vartheta}{1+\vartheta+\vartheta^2},\ \text{где } \vartheta = \frac{\tau_{0,2}}{\tau_{кр}}$$

Данный алгоритм был реализован в итерационной программе. Характеристики материала конструкции, усилия сдвига $q_{сдв}$, геометрия $B$ и $H_{ст}$ заданы, количество вертикальных ребер $n$ – массив $0 \le n \le 100$, с шагом $+1$, а горизонтальных $p$ – варьируется, $0 \le p \le 100$, $p$ подбирается так, чтобы создать контур со сторонами $a$ и $b$ при заданном $\eta_{сдв}$ [5].

Там, где $K_Q \le 0{,}5 \cdot 10^{-5}$ выполняется «условие балки Вагнера» [8] – конструкция не теряет несущей способности при потере устойчивости. Такое решение не удовлетворяет условию, поэтому программа его отбрасывает.

В «чистой» упругой зоне ($\tau_д \le \tau_{кр} \le \tau_{0,2}$) программа без использования итераций определяет толщину стенки $\delta_{ст}$.

Переходя в зону $K_Q > K_{Qmax}$ ($\tau_{кр} > \tau_{0,2} > \tau_д$) подсчет

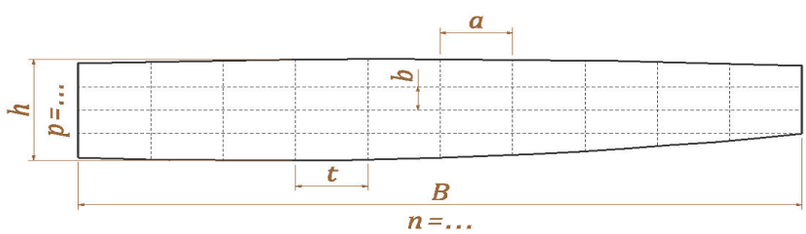



**Рис. 1.** Схема КСС стенки нервюры

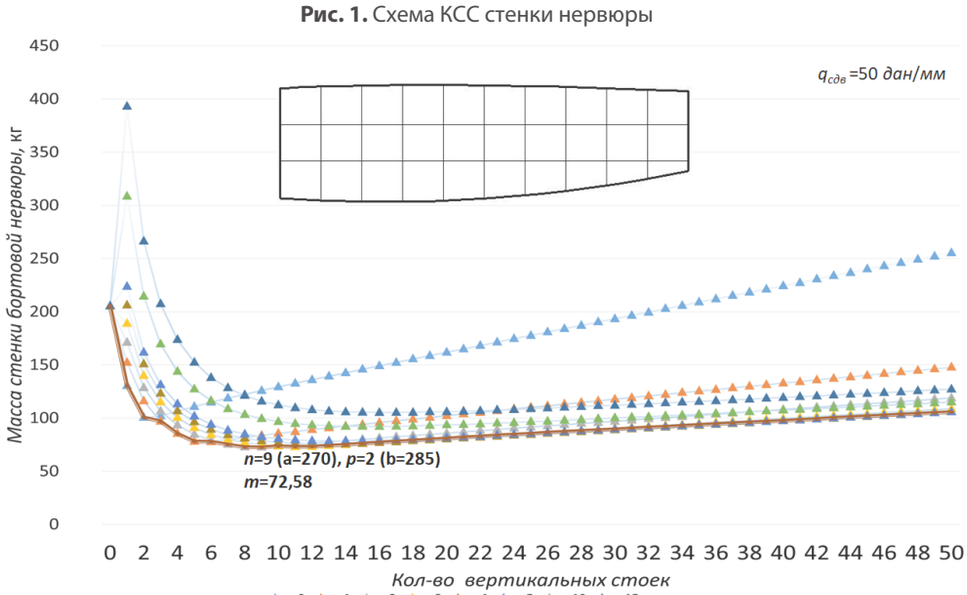



**Рис. 2.** Зависимость массы стенки из алюминиевого сплава от количества вертикальных и горизонтальных ребер

ведется с помощью итерационного изменения толщины стенки.

Масса стенки считается как сумма массы самой стенки и массы ребер жесткости:

$$m = m_p + m_{ст} = \left(\delta_{ст} h_{ср} B + p f_p B + n f_p h_{ср}\right)\rho$$

При выборе количества ребер $p$ для каждого $n$ алгоритм стремится уменьшить массу стенки, следовательно, сравниваются значения $p^n$ и $p^{n-1}$ и подбираются так, чтобы разница масс была максимально возможной [5]. Был получен график для различных КСС стенки бортовой нервюры крыла среднемагистрального самолета (*рисунок 2*).

Анализ конечно-элементным методом решения, приведенного на *рисунке 3*, показал, что большая часть конструкции работает в пределах упругих деформаций.

Монолитные панели и лонжероны – конструкции, работающие на потерю устойчивости от нагрузок сжатия и сдвига. Они подкреплены стрингерами/горизонтальными ребрами жесткости [3].

Для соответствующего количества стрингеров, под нагрузки $q_{сж}$ и $q_{сдв}$ программа формирует потребное сечение с заданным запасом по устойчивости на сжатие $\eta_{сж}$, на сдвиг $\eta_{сдв}$ и по эквивалентным напряжениям $\eta_{экв}$ [7]. К каждому $n_{стр}$ ведется программный подбор двух итерационных переменных: толщины обшивки $\delta_{общ}$ и высоты стрингера $h_{стр}$ [7]. Толщина же стрингера $\delta_{стр}$ определяется из соотношений местной устойчивости и технологичности [4]. Критические напряжения общей потери устойчивости при сжатии $\sigma_{кр}$, как и $\tau_{кр}$, в алгоритме определяются по Эйлеру [3]:

$$\sigma_{кр} = \frac{0{,}9m^2\pi^2 E}{\left(\frac{L}{i}\right)^2}, \sigma^*_{кр} = \sigma_{0,2}\frac{1+\vartheta}{1+\vartheta+\vartheta^2}, \text{где } i = \sqrt{\frac{I}{F}}$$

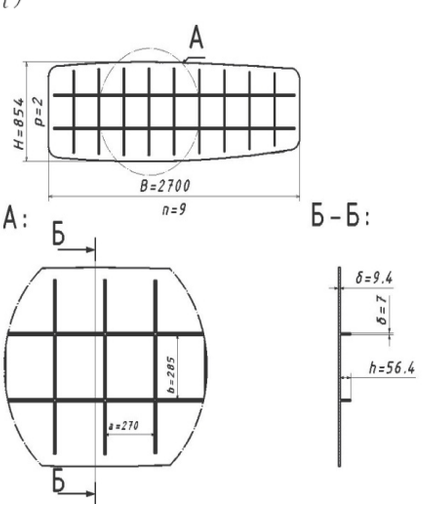



**Рис. 3.** Рассчитанная стенка бортовой нервюры крыла среднемагистрального самолета из алюминиевого сплава

Подбор переменных представляет собой последовательное выполнение условий [7]. Первое из них – устойчивость на сдвиг межстрингерной зоны обшивки панели обеспечивается увеличением ее толщины (*рисунок 4*, *условие 1*):

$$\delta^{i+1}_{общ} = \delta^{i}_{общ} \pm \Delta, \text{пока не } \eta_{сдв}\left(\delta_{общ}\right) \geq 1{,}1$$

Второе условие – общая устойчивость сечения обеспечивается за счет увеличения высоты стрингера (*рисунок 4*, *условие 2*):

$$h^{i+1}_{стр} = h^{i}_{стр} \pm \Delta, \text{пока не } \eta_{сж}\left(h_{стр}; \delta_{общ}\right) \geq 1{,}1$$

Третье условие – выполнение второго при достижении максимальной высоты стрингера за счет утолщения обшивки в зоне подкрепления (*рисунок 5*):

$$\delta^{i}_{общ} = \delta^{i+1}_{общ} + \Delta, \text{пока не } \eta_{сж}\left(\delta_{общ}; h_{стр\ max}\right) \geq 1{,}1$$

Далее выполняются условия технологичности 1 и 2 [4] (*рисунок 6*):

$$h^{i+1}_{стр} = h^{i}_{стр} + \Delta, \text{пока не } \frac{\delta_{стр}}{t_{стр}} \leq 0{,}2 \text{ и } \delta^{i+1}_{общ} =$$

$$= \delta^{i+1}_{общ} + \Delta, \text{пока не } \frac{\delta_{стр}}{\delta_{общ}} \leq 1{,}5$$

После выполнения всех условий полученная форма сечения масштабируется, пока минимальное значение одного из запасов прочности не достигнет $\eta = 1{,}1$ [7].

Определив геометрию сечения, в режиме оптимизации происходит выбор по количеству

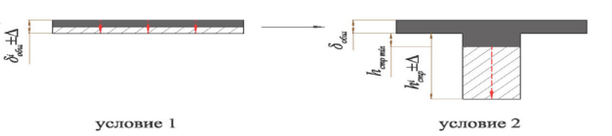



**Рис. 4.** Начало подбора

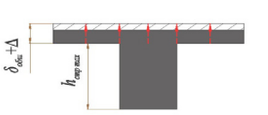


**Рис. 5.** Выполнение третьего условия

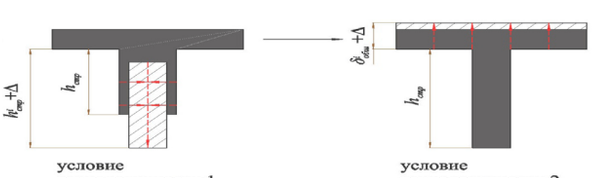



**Рис. 6.** Условия технологичности [4]

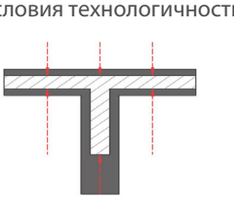



**Рис. 7.** Масштабирование сечения

стрингеров/ребер жесткости того, при котором масса элемента минимальна, аналогично алгоритму формирования стенке нервюры [5]. Так как существует программная погрешность, необходимо уточнения сечения для окрестных значений толщины $\delta_{общ}$ подкрепленной стрингером обшивки (*рисунок 8*) [7]:

$$\delta_{общ\,min} < \delta_{общ}^{i+1} = \delta_{общ}^{i} \pm \Delta < \delta_{общ\,max}, \text{при } \eta \geq 1{,}1$$

Как уже было написано выше, типовые КСС агрегатов планера представляют собой конструкцию, состоящую из подобного рода «панелей» и «стенок». Так, например, центроплан крыла представляет собой балку постоянного коробчатого сечения – «короб» (панели, лонжероны) и его внутренний «каркас» – стенки нервюр [3].

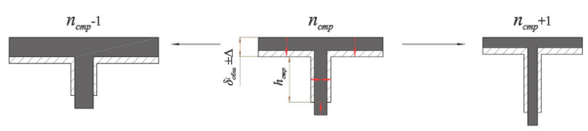



**Рис. 8.** Уточнение сечения

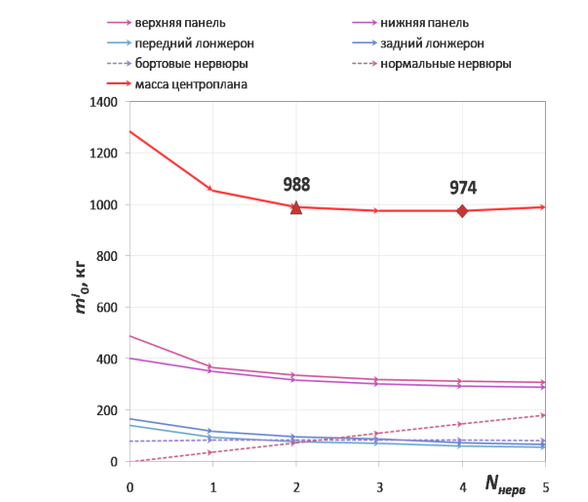



**Рис. 9.** Зависимость массы центроплана и его элементов от количества нервюр

**Рис. 10.** Распределение масс в решении с двумя нервюрами

Следовательно, объединение двух вышеописанных методик в один алгоритм позволит оценивать полноценные конструкции. Поэтому был разработан программный комплекс, позволяющий выбирать КСС, сравнивая суммы масс «коробов» и «каркасов» для различного шага нервюр:

$$m = m_{короба} + m_{каркаса} =$$
$$= m_{панелей} + m_{лонжеронов} + m_{стен}$$

С помощью данной программы был выполнен проектный расчет центроплана среднемагистрального пассажирского самолета со следующими размерами: длина $B$=2700 мм, ширина $D$=3000 мм, высоты $H_1/H_2/H_{max}$=790/700/890 мм.

Решение с четырьмя стенками «каркаса» обладает минимальной массой, однако вариант с двумя более технологичен, т.к. содержит в себе меньше деталей при разнице в массе чуть более 2% (*рисунок 9*).

Как видно из *рисунка 10*, масса панелей составляет более 65% от массы всей конструкции решения.

Поверочный расчет в САПР DS ABACUS® показал, что сформированное решение выдерживает нагрузки, для которых оно было оценено. Напряжения не превышают предел текучести, а значит и отсутствуют опасные остаточные деформации, что соответствует пункту 305 (*а*) АП-25 [10].

### Литература

1. Проектирование самолетов: учебник для вузов / Погосян М. А., Лисейцев Н.К., Стрелец Д.Ю. и др.; ред. Погосян М.А. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Инновационное машиностроение, 2018. 863 с.
2. Шкадов Л.М., Андронов А.С., Лазарев В.В. Основные принципы построения системы проектирования самолета с использованием ЭВМ / Труды ЦАГИ, вып. 2021. М.: ЦАГИ,1979. 36 с.
3. Ендогур А.И. Проектирование авиационных конструкций. Проектирование конструкций деталей и узлов: Учебное пособие. М.: МАИ-ПРИНТ, 2009. 537 с.
4. Колганов И.М., Дубровский П.В., Архипов А.Н. Технологичность авиационных конструкций, пути повышения. Ульяновск: УлГТУ, 2003. 245 с.
5. Крекнин А.В. Выбор КСС стенки бортовой нервюры стреловидного крыла минимальной массы. Авиация России: прошлое, настоящее,

будущее. Материалы IV научно-практической конференции филиала «Стрела» МАИ в г.о. Жуковский (30 ноября-1 декабря 2020 г.). Жуковский: МАИ «Стрела», 2021. 296 с.
6. Абрамов В.И. Проектировочный расчет на сдвиг тонкостенных балок / Теория и практика проектирования пассажирских самолетов: Сб. статей. М.: Наука, 1976. 230 с.
7. Крекнин А.В. Методика и программа инженерной оценки и выбора КСС тонкостенных авиационных конструкций на примере центроплана. Авиация России: прошлое, настоящее, будущее. Материалы V научно-практической конференции филиала «Стрела» МАИ в г.о. Жуковский (25-26 ноября 2021 г.). Жуковский: МАИ «Стрела», 2021. 204 с.
8. Вагнер Х. Балки с весьма тонкой стенкой / Сб. переводов под ред. Уманского А.А. и Знаменского П.П. Жуковский: ЦАГИ, 1937. 148 с.
9. Кичеев В.Е. Проектирование элементов конструкции летательного аппарата с использованием критериев подобия // Электронный журнал «Труды МАИ», 2017. Вып.46. 14 с.
10. Межгосударственный авиационный комитет. Авиационные правила «Нормы летной годности самолетов транспортной категории» (АП-25), редакция 3 с поправками 1-6. ОАО «АВИАИЗДАТ», 2009. 924 с.

УДК 539.182

# О РАЗРЕШЕНИИ SL(2,C)–СИНГУЛЯРНОСТЕЙ В АФФИННЫХ И ТОРИЧЕСКИХ ПРОЕКТИВНЫХ ПРОСТРАНСТВАХ

# ON THE RESOLUTION OF SL(2,C)–SINGULARITIES IN AFFINE AND TORIC PROJECTIVE SPACES

Сергей Владимирович Смуров
*почетный работник науки и техники РФ*
*доктор технических наук, профессор*
Первый Вице-президент Института – Главный конструктор
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93
E-mail: Svs_iif@mail.ru

Геннадий Германович Волков
*доктор физико-математических наук, профессор*
старший научный сотрудник
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**

Наш интерес к изучению $C^n/G$ -сингулярностей, где G – дискретные подгруппы группы SL(n,C), был вызван соответствием между типами этих конечных групп и диаграммами Маккея, которые для случая SL(2,C) совпадали с аффинными диаграммами А-Д-Е серий алгебр Ли. В торических Калаби-Яу пространствах (CYd, d=1,2,3,…) на основе алгебры рефлексивных векторов и сопутствующих им Ньютоновских полиэдров было обнаружено однозначное соответствие между аффинными алгебрами Ли и крепантно-разрешенными конкретными сингулярными структурами, такими как особенности Клейна-Дю-Валя $C^2/G$, где G – дискретная подгруппа $G \subset SL(2,C)$. Симметрийно-групповое содержание компактифицированной теории может быть прочитано из дуальной пары рефлексивных многогранников Калаби-Яу пространств, которые используются для компактификации пяти 10-мерных суперструнных- и M/F-теорий. Универсальная алгебра рефлексивных векторов раскрывает все возможные подструктуры расслоений CYd-пространств для d=3,4,… в виде новых Берже графов новые графы в полиэдрах $CY_n$, за которыми можно обнаружить новые сингулярные структуры, возможно связанные либо с дискретными симметриями $G \subset SL(n,C)$ либо $G \subset SL(n,TC)$.

**Ключевые слова:** ториковая геометрия, проективные пространства, квантовая физика, квантовая информация, алгебры, группы, сингулярности, группа голономии, графы Берже, Калаби-Яу пространства.

**Summary**

Our interest in studying $C^n/G$ -singularities, where G are discrete subgroups of the group SL(n,C), was caused by the correspondence between the types of these finite groups and Mackay diagrams, which for the case of SL(2,C) coincided with the affine diagrams A-D-E series of Lie algebras.In toric Calabi-Yau spaces (CYd, d=1,2,3,…), on the basis of the algebra of reflexive vectors and their accompanying Newtonian polyhedra, a one-to-one correspondence was found between affine Lie algebras and crepant-resolved concrete singular structures, such as the Klein-Du Val $C^2/G$ singularities, where G is a discrete subgroup of SL(2,C). The symmetry-group content of the compactified theory can be read from the dual pair of reflexive Calabi-Yau polytopes of spaces that are used for compactification five 10-dimensional superstring and M/F theories. The universal algebra of reflexive vectors reveals all possible substructures of bundles of CYd-spaces for d=3,4,… in the form of new Berger graphs new graphs in polyhedra CYd, behind which one can find new singular structures, possibly associated either with discrete symmetries $GG \subset SL(n,C)$ or $G \subset SL(n,TC)$.

**Keywords:** toric geometry, projective spaces, quantum physics, quantum information, algebras, groups, singularities. holonomy group, Berger graphs, Calabi-Yau spaces.

## 1. Введение. Сингулярности вакуумов микромира Вселенной и в торической геометрии

Вопросы исследований космических вакуумов и успехи в описании их в современной квантовой физике является базисом для глобальной квантовой телепортации и ее расширения в свете грядущей пост-квантовой науки. Геометрия квантовых состояний с их необычными свойствами и их приложениями в телепортации и вообще во всей квантовой информации глубинно связаны с природой микромира, его ва-

куумами [1-5]. Цели физики сверхвысоких энергий, единственный пока путь проникновения на все более глубинные масштабы микромира, это раскрытие таинственного механизма зарождения электромагнитного заряда, цвета кварков, спина, массы через открытие фундаментальных объектов-преонов (темная материя), которые могли бы стать образующими нашей вселенной. Наблюдаемый нами мир это только небольшая часть того мистического многомерного мира, в который погружена видимая наша Вселенная, рожденная в результате Большого Взрыва, источником которого стала сингулярность в пространстве-времени. До Большого Взрыва вся Вселенная находилась в пространственно-временной пене, и смысл пространства и времени был приостановлен. С открытием Хаббловского красного смещения идея существования одной изначальной точки Вселенной является определяющей для многих космологических моделей, базирующихся на квантовой гравитации и теории 10-мерныхсуперструн/Д-бран, в которых эволюция Вселенной началась с бесконечно малой, бесконечно горячей, бесконечно плотной точки, известной как сингулярность Большого взрыва, где все физические законы нарушены[6].

Теория D=10-мерных суперструн и M/F D=11/12-мерные теории базируются на бинарных группах Ли, в частности, используют для описания многомерного пространства-времени «обычные» D-мерные группы Лоренца с возможными бинарными модификациями. В результате поиск единой теории великого объединения (ТВО) всех фундаментальных взаимодействий симметрий Стандартной модели $SU(3^c)xSU(2_I)xU(1_Y)\subset SU(5)$, S0(10), E(6), E(8)xE(8), достижимых в подходах 5-дуальных D=(10-12)-мерных N=1,2-суперструн-супергравитационных теорий, с одной стороны не решил вопрос о стабильности протона (также не открыта суперсимметричная материя), а с другой – не смог дать нам какой либо информации о той мааркрионной материи и происхождении вакуумов $SU(3^c)$-цветовой калибровочной симметрии кварковой материи с ее фундаментальной проблемой запирания кварков и глюонов внутри адронов, а также вакуума электрослабой $SU(2_I)xU(1_Y)$-калибровочной симметрии, нарушенной в Хиггсовском поле до U(1em)-электромагнитной симметрии. На наш взгляд, основная проблема в этих теориях – неадекватная внешняя симметрия на масштабах $M_{струна} >> M_{Хиггс}$ или при построении теорий в D=10-12-мерном пространстве-времени, где симметрия D-мерная группа Лоренца должна была быть обобщена нетривиальным образом, например, как в теории n-арных симметрий с n>2. Новые симметрии за пределами групп Ли и прорыв в многомерной геометрии, в которой различные виды сингулярностей могут стать источниками соответствующих глобальных или локальных симметрий вакуумов, которые могли бы реализоваться как в расширениях специальной теории относительности в пространстве-времени с дополнительными пространственными и/или временными измерениями, так и в более детальных структурах протона (кварков) и электрона. Для построения 4-х мерных Стандартной Модели или ТВО в теории D=10-12-мерных суперструнных теорий дополнительные пространственные измерения (D-4)-компактифицировались на пространства $CY_d$, где d=1,2,3,4 комплексная размерность (2d=D-4). Наша гипотеза [7,8,9] заключается в том, что $CY_{3,4}$ ($CY_d$) пространства через сингулярности могут быть связаны с новыми симметриями, например, с тернарными (n-арными) симметриями [1-5,7], которые являются естественным обобщением бинарных симметрий Картана–Киллинга–Ли. Алгебра рефлексивных проективных чисел дает подход к построению Ньютоновских рефлексивных многогранников, соответствующих торическим квазипроективным пространствам Калаби-Яу в трех или более комплексных измерениях со слоями K3. На этих Ньютоновских полиэдрах согласно алгебре рефлексивных проективных чисел выявляются графы Берже [1,2,7,8], которые включают и обобщают диаграммы Кокстер-Дынкина для $CY_2=K_3$-пространств, связанных через раздувание $G\subset SU(2)$-сингулярности с уже известными A-D-E-типами Киллинг-Картан-Ли алгебр их бесконечномерных аффинных расширений [10-14]. Представленная возможная корневая структура для графов Берже и связанных с ними матриц Берже могут характеризовать обобщения упомянутых алгебр[7,8].

### 2. Изолированные сингулярности Калаби-Яу пространств

Многообразие Калаби-Яу $CY_n$.n=1,2,3, это комплексное кэлерово многообразие с SU(n)-группой голономии, что эквивалентно требованию тривиальности канонического расслоения. При построении таких многообразий в этих пространствах с ростом размерности встречаются все более и более сложные типы сингулярностей, структура и разрешение которых представляют огромный интерес как для торической проективной геометрии, так и для D=10-мерных суперструнных и D=11-мерных M-, D=12-мерных F-теорий [11-12]. Одними из самых простых особенностей, которые могут воз-

никнуть, являются орбифолдные особенности.

Математически орбифолд можно определить как пространство, которое допускает открытое покрытие $\{U_i\}$ такое, что каждая карта диффеоморфна $R^n/G_i$, где $G_i$ – это дискретные группы. Физики рассматривают орбифолд более глобальным и определяют его как пространство формы M/G, где M – многообразие, а G – дискретная группа. Большая часть огромного объема статей, посвященных суперструнным теориям на орбифолдах, опиралась на глобальную форму M/G. Определение орбифолда можно расширить до понятия комплексного орбифолда, где каждая карта биголоморфна $C^n/G_i$, а функции индуцированного перехода между картами голоморфны. Точно так же комплексный орбифолд может быть вложим в комплексное проективное пространство $P^N$ и поэтому может рассматриваться как алгебраическое многообразие. В этом случае понятие канонического класса еще актуально и определение 2-мерной комплексной поверхности $CY_2=K_3$ может быть расширено при включении орбифолдов [9-11].

Классически K3=$CY_2$-поверхности, дающие расширенные калибровочные симметрии для N=2 суперсимметричных струн II-типа, имеют факторные сингулярности и, таким образом, являются орбифолдами, насколько это касается геометрии целевого пространства [10-12]. Геометрически орбифолд – это пространство, единственные особенности которого локально представлены в виде некоторого гладкого пространства (обычно $C^n$), модифицированного по модулю некоторой дискретной группы, фиксирующего начало координат. Частным случаем такого орбифолда является случай глобального орбифолда, который можно записать в виде Y/G для некоторого гладкого многообразия Y, допускающего некоторую группу автоморфизмов G. В этом глобальном случае можно также определить орбифолд с точки зрения теории струн или конформной теории поля, непосредственно принимая частное теории поля, описывающее Y группой G. Известно, что такие орбифолдные теории ведут себя хорошо, несмотря на то, что очевидное целевое пространство является сингулярным. Орбифолд – это фактор гладкого Калаби-Яу многообразия с дискретным групповым действием, которое в общем случае имеет неподвижные точки. Локально такой орбифолд моделируется на $C^n/G$, где G – конечная подгруппа в SL(n,C).

### 3. K3-гиперповерхности и разрешение простейших сингулярностей

K3-поверхность S определяется, как компактное комплексное кэлерово многообразие комплексной размерности два, т.е. поверхность, такую, что $h^{1,0}(S)=0$,K=0, где $h^{p,q}(S)=\dim(H^{p,q}(S))$ – числа Ходжи, равные размерности группы когомологий Долбо $H^{p,q}(S)$. $K=-c_1(T_X)$-канонический Черна класс для голоморфного касательного расслоения S[9-12]. Классы Черна расслоения E: $c(E)=1+c_1(E)+c_2(E)+...$ и $T_S\oplus N_S=T_{P3/S}$, касательное и кокасательное расслоения поверхности в $P^3$.

Анализ $CY_2=K_3$ поверхностей ($\dim_C S=2$), которые могут быть вложены алгебраическими голоморфными уравнениями в комплексные проективные пространства $P^N$ для некоторого N, может осуществляться в терминах алгебраических кривых $C_S(\dim_C=1)$, т.е. римановых поверхностей, вложенных в K3-поверхность S. Ясно, что такая кривая $C_S$ голоморфно рассматривается как гомологический цикл и, таким образом, является элементом $H_2(S, Z)$. Используя Пуанкаре дуальность и голоморфность вложения кривой $C_S$, можно показать принадлежность кривой $C_S$ группе Пикара

$$C_S \in \mathrm{Pic}(S) : \mathrm{Pic}(S) = H^2(S,Z) \cap H^{1,1}(S),$$

для которой вводится обозначение $\rho(S)$ как ранг решетки Пикара. Любой элемент группы Пикара, $e \in \mathrm{Pic}(S)$ соответствует линейному расслоению L, такому что $c_1(L)=e$ [8]. Таким образом, группа Пикара можно рассматривать как группу линейных расслоений на S, где групповая композиция есть произведение Уитни. Таким образом, тот факт, что S содержит кривую $C_S$, является ограничением на комплексную структуру поверхности S. В результате, деформации алгебраической поверхности K3 ограничены вложением в $P^N$ одной или нескольких кривых $C_S$: $\rho(S)\leq 20$ причем максимум 20 достигается для квадратичной степени 4 Ферма поверхности [11]:

$$F=x_1^4+x_2^4+x_3^4+x_4^4=0 \subset P^3 \qquad (1)$$

Пример орбифолда K3 можно построить следующим образом, исходя из 4-тора, как комплексного многообразия размерности 2 и с фактор- делением комплексного пространства $C^2$ с аффинными координатами $(z_1, z_2)$. Группа $Z_4$ порождается следующими преобразованиями $z_k \to z_{k+1}$, $z_k \to z_{k+i}$, k=1,2. Далее вводится группа изометрий $Z_2:(z_1, z_2)\to(-z_1,-z_2)$, которая фиксирует в S-16 точек. Таким образом, орбифолд $S_0$, в котором $Z_2$-действие сохраняет комплексную структуру и оставляет кэлерову форму инвариантной, $S_0$ будет комплексным келеровым орбифолдом с инвариантной голоморфной формой $dz^1 \wedge dz^2$ и $\pi_1(S_0)=0$. Таким образом, можно ожидать K=0 и орбифолд $S_0$ можно отождествить с K3 поверхностью. Для того, чтобы сделать $S_0$ гладким, применяется процесс известный как

взрыв или раздутие особых точек. В данном случае особым подпространством является $C^2/Z_2$, которое можно описать алгебраически, вкладывая его в $C^3$ с координатами $(x_0,x_1,x_2)$ и рассматривая в нем гиперповерхность квадратичного конуса $\{f=x_0x_1-x_2^2=0\}\subset A$ с сингулярностью в начале координат. Параметризация $f=0$ в новых координатах $x_0=\xi^2$, $x_1=\eta^2$, $x_2=\xi\eta$ обнаруживает двойное вырождение точек $(\xi,\eta)$ и $(-\xi,-\eta)$. Это единственное отождествление делает поверхность $f=0$ в $C^3$ орбифолдом $C^2/Z_2$. Подпространство $C^3\times P^2$ [11]:

$$\{(x_0,x_1,x_2),\ [s_0,s_1,s_2]\in C^3\times P^2;\ x_is_j=x_js_i,\forall i,j\} \quad (2)$$

можно рассматривать двояко – либо пытаясь спроецировать его на $C^3$, либо на $P^2$. Фиксация точки в $P^2$ определяет линию, $C^1$ в $C^3$, и значит уравнение (2) определяет линейное расслоение на $P^2$. Для этого расслоения можно определить $c_1=-H$, где H – класс гиперплоскости и соответственно расслоение $O_{P2}(-1)$. В качестве альтернативы можно зафиксировать точку $p\in C^3$, которая при условии $p\neq(0,0,0)$, будет определять точку в $P^2$. Однако если $p=(0,0,0)$, то охватывается все $P^2$. Таким образом, $O_{P2}(-1)$ можно поточечно отождествить с $C^3$, за исключением того, что начало координат в $C^3$ было заменено на $P^2$. Таким образом, пространство (2) является раздутием $C^3$ в нуле. $O_{P2}(-1)$ и $C^3$, как комплексные пространства в общем изоморфны, а за исключением некоторого подмножества эти пространства бирационально эквивалентны. Пространство X раздутое в точке обозначается в виде $\tilde{X}$, а бирациональное отображение между ними обычно записывают $\pi:\tilde{X}\to X$. То есть π представляет собой сжатие $\tilde{X}$, а комплексное проективное пространство $P^2$, раздувшееся из начала, является исключительным дивизором. При раздутии гиперповерхность A, заданная в $C^3$, преобразуется в гиперповерхность $A'\subset X'$, равная замыканию множества точек $\pi^{-1}(A\setminus\{0\})\subset X'$, образующее сферу $s_0s_1-s_2^2=0$, $P^1\subset P^2(\chi=2)$ (*рисунок 1*). Таким образом, при раздутии начала координат для $A\subset C^3$ собственное преобразование A исключительный дивизор $E=P^1$ заменяет особенность в начале координат, а пространство A' теперь уже гладкое. Исключительный дивизор $E\subset A'$ можно рассматривать как нормальное расслоение $O_{P1}(-2)$. Такая рациональная (нулевого рода g=0) кривая на комплексной поверхности называется (−2)-кривой *рисунок 1* [11].

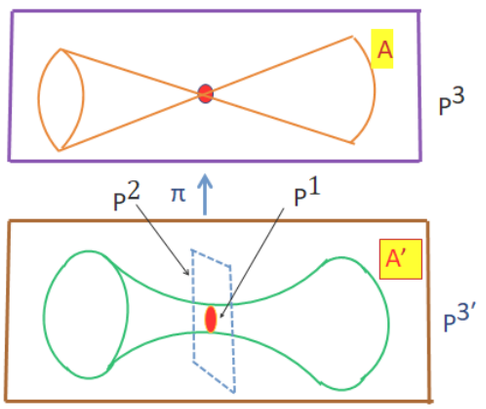



**Рис. 1.** Процесс раздутия $A\sim C^2/Z_2\to A'$[11]

Самопересечение кривой можно найти, деформируя кривую до другой, гомологически эквивалентной, и подсчитыванием количества точек пересечения (со знаками, указывающими ориентацию), то есть подсчитыванием количества неподвижных точек при деформации. Тогда бесконечно малую такую деформацию можно рассматривать как сечение нормального расслоения $C_S$, а самопересечение – это число нулей, т.е. значение $c_1$ нормального расслоения, проинтегрированного над $C_S$. Таким образом, $c_1(N)$дает самопересечение, где N – нормальное расслоение. Заметим, что две алгебраические кривые, которые пересекаются поперечно, всегда имеют положительное пересечение, так как комплексная структура фиксирует ориентацию. Таким образом, это можно сделать только при $c_1(N)>0$. Формула присоединения, $c_1(N)+c_1(T)$, где T – касательное расслоение $C_S$, должна давать первый класс Черна поверхности вложения, ограниченной $C_S$. Таким образом, если $K=0$, $C_S\cdot C_S=2(g-1)$ и, значит, любая рациональная кривая на поверхности K3 должна быть (−2)-кривой. На самом деле, если раздуть все 16 неподвижных точек исходного орбифолда $S_0$, то получается гладкая гиперповерхность $CY_2=K3$. Чтобы убедиться в этом, нужно только показать, что совершенные раздутия не влияют на $K=0$. Можно показать, что это действительно так, если исключительный дивизор удовлетворяет условию, т.е. является (−2)-кривой [10,11]. Гладкая поверхность K3, полученная как раздутие $T^4/Z_2$ при всех 16 неподвижных точек является поверхностью Куммера, которая не обязательно должна быть алгебраической, как и исходная поверхность $T^4$. Оказалось, что любая рациональная кривая на K3-поверхности является элементом решетки Пикара с $C_S\cdot C_S=-2$, напоминающий термин корень из теории алгебр Ли.

### 4. Разрешение сингулярностей дискретных подгрупп группы SL(2,C)

Мы рассмотрели случай разрешения единичной сингулярности $C^2/Z_2$ изолированной (−2)-кривой, сопоставляемой алгебре $A_1$. Более общее утверждение связано с тем, что разрешение сингулярностей $C^2/Z_n$, где цикличе-

ская группа $Z_n$ генерируется $(u,v)\to(\varepsilon u,\varepsilon^{-1}v)$, где $\varepsilon=\exp(2\pi i/n)$, дает матрицу пересечения $A_{n-1}$ для $(-2)$-кривых (см. *таблицу 2*) [13-16]. Остальные группы описываются образующими и каждая группа «бинарна» в том смысле, что они содержит -1 в качестве своего центра, и являются двойным покрытием группы вращений правильного твердого тела в евклидовом трехмерном пространстве при двойном накрытии $SU(2)\to SO(3)$. Так двоичный диэдральная группа $BD_{4n}$ порождается ограничениями на ее генераторы:

$$\alpha=\begin{pmatrix}\varepsilon & 0\\ 0 & \varepsilon^{-1}\end{pmatrix},\beta=\begin{pmatrix}0 & 1\\ -1 & 0\end{pmatrix} \qquad (3)$$

где $\varepsilon=\exp(\pi i)$, так что $\alpha^n=\beta^2=-1,\alpha\beta=\beta\alpha^{-1}$.

Рассмотрим полином $f=x^2-y^2z-z^3$ (*рисунок 2*). Поверхность V(f) имеет изолированную рациональную сингулярность в начале координат. Чтобы решить ее, нам нужны два раздутия. После первого там будут три различные особые точки в исключительном дивизоре. Взорвав сразу три из них, получаем разрешение Y. Исключительный дивизор E является объединением четырех рациональных кривых $C_i$.

Общая картина орбифолдных особенностей $C^2/G$ (*таблица 1*) осуществляется в случае рассмотрения всевозможных дискретных подгрупп G в SU(2), являющейся группой голономии K3=-CY2. Конечные подгруппы SU(2) лучше всего понятны из точной последовательности [13-18]:

$$1\to Z^2\to SU(2)\to SO(3)\to 1 \qquad (4)$$

Таким образом, любую подгруппу из SU(2) можно спроецировать в подгруппу из SO(3) и рассматривать как симметрию трехмерного тела. Циклические группы $Z_n$ можно рассматривать, например, как симметрии конусов над правильными многоугольниками. Другие возможности – двугранный группы, представляющие собой симметрии призм над правильным многоугольником, и симметрии тетраэдра, октаэдра (или куба) и икосаэдр (или додекаэдра). Каждая из этих последних групп неабелева и соответствует подгруппе SU(2) с вдвое большим элементов, чем в подгруппе SO (3). Поэтому их называют бинарными диэдрами, бинарными тетраэдрическими, бинарными октаэдрическими и бинарными икосаэдрическими группами соответственно. В каждом случае фактор $C^2/G$ вкладывается как гиперповерхность в $C^3$ [13-16].

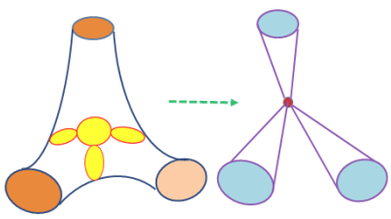


**Рис. 2.** Минимальное разрешение $D_4$-сингулярности $x^2-y^2z-z^3=0$

Аналогично рассмотренной сингулярности можно проанализировать сингулярности для всех дискретных подгрупп G группы SU(2) соответствующим образом, достигая классификации односвязных аффинных расширенного типа A-D-E-алгебр [17-18].

Когда рассматривается гиперповерхность в $C^3$, то ее можно раздувать до тех пор, пока не достигается гладкая поверхность. Затем можно показать, что матрицы пересечения полученных $(-2)$-кривых равны (с точностью до знака минус) матрицам Картана $A_n$, $D_n$, $E_6$, $E_7$, $E_8$, соответственно (*таблица 1*). Таким образом, любое вырождение поверхности K3, которое может быть достигнуто стягиванием $(-2)$-кривых, приводит к орбифолдной особенности. Все особенности, приведенные в *таблице 1*, имеют разрешение в виде набора -2-кривых.

Уравнение представляет собой полином f(x,y,z), где $\{0\}\in X:(f(x,y,z)=0)\subset A^3$ – изолированная особенность вложенной поверхности. Индекс «n» $A_n,D_n,E_6,E_7,E_8$ соответствует количеству -2-кривых в разрешении. Конфигурация -2 кривых разрешению соответствует диаграмме Кокстера-Дынкина. Группы в среднем столбце – это все возможные конечные подгруппы SL(2,C). Особенности Дюваля характеризуются своей абсолютно изолированной двойной точкой: $p\in X$, которая допускает разрешение $X_n\to X_{n-1}\to\ldots\to X_1\to X$, где каждый шаг $X_i\to X_{i-1}$ – это раздутие изолированной двойной точки над $p\in X$. Другая характеристика связана с существованием крепант разрешения особенностей $\varphi:Y\to X$, при котором $K_Y=\varphi^*K_X$ представляет канонический класс $K_Y=0$ в окрестности исключительного локуса. Крепант разрешения не обязательно могут существовать в размерности $\geq 4$ [13-16].

Это чудесное соответствие между классификацией дискретных подгрупп A-D-E SU(2) и

**Таблица 1**

Типы сингулярностей $C^2/G$ с КД-диаграммами A-D-E типа

| | |
|---|---|
| $A_n\cdots\to x^2+y^2+z^{n+1}$ | |
| $D_n\cdots\to x^2+zy^2+z^{n-1}$ | |
| $E_6\cdots\to x^2+y^3+z^4$ | |
| $E_7\cdots\to x^2+y^3+yz^3$ | |
| $E_8\cdots\to x^2+y^3+z^5$ | |

диаграмм Дынкина для односвязных простых групп Ли должны считаться одним из самых важнейших взаимосвязей между сингулярностями аффинными и проективными алгебраическими многообразиями и неприводимыми представлениями алгебр Ли и их бесконечномерными расширениями аффинных алгебр. С последними мы встречаемся в теории суперсимметричных струн.

### 5. Типы сингулярностей SL(n,C) и Маккей соответствие

С геометрической точки зрения мы можем попытаться разрешить орбифолдную сингулярность. Разрешение $(X,\pi)C^n/G$ есть гладкое комплексное многообразие X размерности n с собственным биголоморфным отображением: $X\to C^n/G$ индуцирующий биголоморфизм между плотными открытыми множествами. Мы называем X крепантной резолюцией, если канонические расслоения изоморфны, $K_X \cong \pi^*(K_{Cn/G})$. Поскольку многообразия Калаби-Яу имеют тривиальное каноническое расслоение, для получения структуры Калаби-Яу на X необходимо выбрать крепантные разрешения особенностей. Оказывается, то количество информации, которое мы знаем о крепантном разрешении особенностей $C^n/G$ сильно зависит от размерности n орбифолда[13-16]:

- n=2: крепантное разрешение всегда существует и уникально. Его топология полностью описывается в терминах конечной группы G через соответствие Маккея;
- n=3: крепантное разрешение всегда существует, но оно не единственное. Однако все крепантные разрешения имеют одни и те же числа Эйлера и Бетти: струнные числа Бетти и Ходжа;
- n=4: в этом случае очень малоизвестно, крепантные разрешения существуют в довольно частных случаях. Много особенностей являются терминальными, что означает, что они не допускают крепантного разрешения.

Мы хотели бы полностью понять топологию крепантных разрешений в случае n=3, отталкиваясь далее от случая n=2.

Случай n=2. Фактор особенности $C^2/G$ для G – конечной подгруппы группы SL(2,C) были впервые классифицированы Клейном, и называются кляйнианскими особенностями (они также известны как особенности Дюваля или рациональные двойные точки). Имеется пять семейств конечных подгрупп группы SL(2,C): циклические подгруппы $Z_n$, бинарные группы диэдра Dn порядка 4n, бинарная тетраэдрическая группа T порядка 24, бинарная октаэдрическая группа O порядка 48 и бинарная группа икосаэдра I порядка 120 [17,18]. Для каждого семейства существует крепантное разрешение. и оно единственно. Более того, конечная группа полностью описывает топологию разрешения. Это закодировано в Соответствии Маккея, которое устанавливает взаимное соответствие между набором неприводимых представления группы G и множество вершин расширенной диаграммы – Кокстера-Дынкина типа ADE (КД-диаграммы, соответствующие простым алгебрам Ли следующих пяти типов: $A_{k-1}$, $D_{k+2}$, $E_6$, $E_7$ и $E_8$). Конкретно, пусть $\{R_0,R_1,...,R_r\}$ – множество неприводимых представлений группы G, где $R_0$ обозначает одномерное тривиальное представление. С группой G и его неприводимыми представлениями ассоциируются $(r+1)\times(r+1)$ матрицы смежности $A=[a_{ij}]$ с $i,j=0,\ldots,r$. Элементы $a_{ji}$ – целые положительные числа; они определяются разложение тензорного произведения, где Q обозначает естественное двумерное представление группы G, индуцированное вложением $G\subset SL(2,C)$. Маккей доказал, что матрица A связана с матрицей Картана типа A-D-E типа и соответствующими аффинными диаграммами Кокстера-Дынкина: A=2I-eC (где eC – аффиная матрица расширенной диаграммы Кокстера-Дынкина) (см.[16]и сравни табл.2 и табл.3).

### 6. Конечные подгруппы SL (2,C)

Интересные изолированные поверхностные сингулярности возникают из факторов $C^2/G$, где G – конечная группа группы SL(2,C). Любая конечная подгруппа из SL(2,C) сопряжена с подгруппой из SU(2) по той причине, что можно построить G-инвариантную эрмитову метрику в $C^2$. Несколько слов о классификации конечных подгрупп группы SU(2) [17,18]. Как непосредственное следствие определения, группа SU(2) димеоморфна сфере $S^3$ и, следовательно, просто связана. Более того, существует накрывающее отображение 2:1:$SU(2)\to SO(3)$, реализующее его как универсальное покрытие SO(3) или, другими словами, как Spin(3).

Поскольку единственным элементом порядка 2 в SU(2) является -1, и если G – конечная подгруппа SU(2), то с точностью до сопряжения G – циклическая группа конечного порядка или $G=\pi^{-1}(G')$ с G' конечной группой SO(3), то есть бинарная полиэдральная группа. Действительно, если $|G|$ нечетно, то $G\cap\ker\pi=\{1\}$ и, следовательно, $G=\pi(G)$, а значит, оно должно быть циклическим. В противном случае, если $|G|$ четно, то по теореме Силова оно содержит подгруппу порядка степени 2, а значит, элемент порядка 2, т.е. должна содержать ядро. Следовательно, $G=\pi^{-1}\pi(G)$.

После предыдущего замечания, чтобы клас-

сифицировать с точностью до сопряжения конечные подгруппы SU(2), нужно классифицировать конечные подгруппы SO(3). Пусть G – конечная подгруппа группы SO(3). Пусть p точка $R^3$, $p \neq 0$. Тогда орбита Gp может быть плоской или не плоской. Если Gp плоская, то G циклическая порядка n, или группа диэдра (порядка 2n), то есть группа симметрии многоугольника с n сторонами. С другой стороны, если орбита не плоская, то это множество вершин правильного многогранника, а G – его симметрия группа [17,18]. Так как куб и октаэдр, додекаэдр и икосаэдры – двойственные пары платоновых тел, они имеют одну и ту же группу симметрии. Следовательно, все возможные группы симметрии платоновых тел: тетраэдрическая группа, изоморфная знакопеременной группе A4, с 12 элементами, октраэдрическая группа, изоморфная симметрической группе S4, с 24 элементами, икосаэдрическая группа, изоморфная S5, с 60 элементами. Как следствие предыдущих двух замечаний, список всех возможных конечных подгрупп G группы SU(2) (и группы SL(2,C)) с точностью до сопряжения.

Для построения классификации конечных подгрупп SL (2,C) можно следовать с использованием классификации кватернионов, преследуя цель классифицировать конечные подгруппы SL(3, C). Хорошо известно, что SL (2, C) это специальная линейная группа степени 2 над комплексным полем C множества (2x2)-комплексных матриц с определителем 1, представляющая собой группу соотносительно умножения матриц и обращения матриц, обозначаемых:

$$SL(2,C)=\left\{A:=\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}, a,b,c,d \in \mathbb{C}, \det A = ad-bc=1\right\} \quad (5)$$

Специальная линейная группа степени 2 – это группа линейных преобразований $C^2$ с det=1, с геометрической точки зрения сохраняющая объем и ориентацию:

$$C^2 \to C^2: (z_1,z_2) \to (z_1',z_2') = (az_1+bz_2, cz_1+dz_2) \quad (6)$$

Если G – конечная подгруппа в SL (2, C), то G с точностью до сопряжения является одним из следующих случаев:

- циклическая группа вида $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}, n \in \mathbb{N}$;
- бинарная группа диэдра вида $BD_{4n}$ с $n \in \mathbb{N}$;
- бинарная группа, соответствующая одному из Платоновых тел, то есть $BT_{24}$, $BO_{48}$ или $BI_{120}$.

Эта и есть полная классификация любой конечной подгруппы в SL(2;C). Следует отметить, что у нас есть пять Платоновых тел, но у нас есть только три двоичные=дуальные группы, соответствующие каждому из них. Это связано с двойной идентификацией. Платоновы тела, а именно тетраэдр, гексаэдр, октаэдр, додекаэдр и икосаэдр сводятся по дуальности к тетраэдру, октаэдру и икосаэдру. Дуальный многогранник определяется как многогранник чьи вершины соответствуют граням первого, а грани соответствуют к вершинам, то есть меняется местами вершины и грани. Тогда дуальный многогранник тетраэдра самодуален); дуальный многогранник шестигранника=куба - октаэдр, а додекаэдр и икосаэдр дуальны друг с другом. Два дуальных многогранника имеют одну и ту же группу вращений, которая определяет многогранник (т.е. два дуальных многогранника образуют один и тот же набор осей вращения), называется чистой полиэдральной группой, а бинарные полиэдральные группы образуют - инверсию к чистым полиэдральным группам посредством канонического гомоморфизма от SL (2,C) до PGL (2,C). Итак, для нашей цели достаточно изучить три тела Платона. Пусть V – векторное пространство над полем F, а GL(V) – его полная линейная группа, то есть группа всех обратимых линейных преобразований. Эта группа коммутирует с гомотетиями Z(V) пространства (умножением на ненулевые константы поля, поэтому ее элементы индуцируют преобразования проективного пространства- факторпространство по действию группы P(V)=V/Z(V). Проективная группа есть факторгруппа по ядру действия PGl(V)=Gl(V)/Z(V).

Важнейшим утверждением является то обстоятельство, что каждая конечная подгруппа SL(2,C) сопряжена конечной подгруппе SU(2) $\subset$SL(2,C), что упрощает решение проблемы классификации сводя к классификации конечных подгрупп специальной унитарной группы SU(2).

Понятие унитарности связано с эрмитовым внутренним скалярным произведением на C,<..>:$C^2 \to C$, которое является комплексной билинейной положительно определенной формой на C [17,18].

Классическим примером эрмитова скалярного произведения на C является $\langle u,v\rangle = u\overline{v}+v\overline{u}$, где $u=u_1+iu_2$; $v=v_1+iv_2 \subset C$.

Специальная унитарная группа степени 2 над полем C – это множество 2x2 унитарных матриц с определителем 1 и комплексными элементами, которая представляет собой группу относительно умножения и инверсии матриц. Очевидно, что это подгруппа SL (2, C), обозначаемая:

$$SU(2)=\{U \in SL(2,C): UU^*=U^*U=I_2\}, (7)$$

где U обозначает сопряженное транспонирование U.

Каждая конечная подгруппа SL(2, C) сопряжена с конечной подгруппой группы SU(2), поскольку она оставляет инвариантным эрмитово скалярное произведение и цель классификации

конечных подгрупп SL(2, C) сводится к перечислению всех конечных подгрупп SU(2).

Конечные группы вращения как подгруппы группы SO(3).

Дальнейшее упрощение проблемы классификации конечных подгрупп SU(2) будет уже связано с классификацией конечных групп изометрии $R^3$. Специальная ортогональная группа размерности 3 над R - это группа вращений $R^3$, являющаяся ортогональной подгруппой группы O (3), матрицы преобразования которой имеют определитель 1:

$$SO(3)=\{O\in O(3):\ \det O=1\}, \quad (8)$$

$$O(3)=\{Q\in GL(3,R):\ Q^t=Q^{-1}\}. \quad (9)$$

Многогранные группы. Пусть $SO(3,\mathbb{R})$–группа вращений в $R^3$. До сопряжения, существует пять различных типов конечных подгрупп $SO(3,\mathbb{R})$, называемых полиэдральными группами:

- циклические группы $C_n\cong\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ порядка $n\geq 1$;
- группы диэдра $D_n\cong\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}\rtimes\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ порядка $2n$, $n\geq 1$;
- группа T положительных изометрий правильных тетраэдров, изоморфных альтернативной группе $A_4$ порядка 12;
- группа O положительных изометрий правильного октаэдра или куба, изоморфная симметрической группа $S_4$ порядка 24;
- группа I положительных изометрий правильного икосаэдра или правильного додекаэдра, изоморфна альтернативной группе $A_5$ порядка 60.

Конечные подгруппы группы SU(2).

Так как группа SO(3) связана с группой вращения единичной сферы $S^2\subset R^3$, то можно связать конечные группы SU(2) с конечными группами SO(3).

Двойное накрытие $SU(2)\xrightarrow{2:1}SO(3)$ позволяет свести задачу классификации конечных подгрупп группы SU(2) к классификации конечных подгрупп группы SO(3), которая является группой симметрии вращения единичной сферы $S^2$ в пространстве $R^3$.

SU(2) представлена в виде марицы 2x2

$$SU(2)=\left\{\begin{pmatrix}a & b\\ -\bar{b} & \bar{a}\end{pmatrix}\middle|\,a,b\in C,|a|^2+|b|^2=1\right\} \quad (10)$$

$$\cong\{x_1^2+x_2^2+x_3^2+x_4^2=1\,|\,x_i\in R\}=S^3\subset R^4$$

**Таблица 2**

5 конечных подгрупп группы SO(3)

| G⊂SO(3) | Генераторы | \|G\| |
|---|---|---|
| $C_n$ | $a^n=1$ | n |
| $D_{2n}$ | $a^2=b^n=(ab)^2=1$ | 2n |
| $A_4$ | $a^3=b^3=(ab)^2=1$ | 12 |
| $S_4$ | $a^3=b^4=(ab)^2=1$ | 24 |
| $A_5$ | $a^3=b^5=(ab)^2=1$ | 60 |

единичная 3-мерная сфера $S^3$ в 4-х мерном эвклидовом пространстве $R^4$. Используя свойства сюръективного группового гомоморфизма

$$\pi: SU(2)\xrightarrow{2:1}SO(3) \quad (11)$$

где ядро гомоморфизма $\ker(\pi)=\{\pm I_2\}$. В частности, так как прообраз подгруппы является подгруппой, то конечные подгруппы $SU(2)/\{\pm I_2\}$ являются прообразами естественной проекции конечных подгрупп группы SO(3) (двойное покрытие $SU(2)\to SO(3)$).

Итак, конечная подгруппа $G\subset SU(2)$ определяет конечную подгруппу $\bar{G}\subset SO(3)$, и наоборот, если $\bar{G}\subset SO(3)$ конечна, то она может быть расширена до конечной $G\subset SU(2)$ с ядром порядка 2. Обозначение подгрупп SO(3) как $\bar{G}\subset SO(3)$, связано с тем, что они происходят из проекции. Все конечные подгруппы SL(2,C), которые были найдены (кроме одной, циклической подгруппы нечетного порядка) будут содержать подгруппу порядка 2, $\{\pm I_2\}$, поскольку они будут иметь четный порядок и $\pm I_2$ – единственный элемент SU(2) с порядком 2, что легко проверить при выполнения следующего равенства:

$$\begin{pmatrix}a & b\\ -\bar{b} & \bar{a}\end{pmatrix}^2=\begin{pmatrix}a^2-|b|^2 & ab+b\bar{a}\\ -\bar{b}a-\bar{a}\bar{b} & -|b|^2+\bar{a}^2\end{pmatrix}=$$
$$=\begin{pmatrix}a^2-|b|^2 & b(a+\bar{a})\\ -\bar{b}(a+\bar{a}) & -|b|^2+\bar{a}^2\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\end{pmatrix} \quad (12)$$

если и только если $a^2=|\bar{a}|^2, b=0$.

Следовательно, если $-I_2\in G$, то $|G|=2|\bar{G}|$ и $|G|=|\bar{G}|$ в противном случае (когда G – циклическая группа нечетного порядка). Все конечные подгруппы SL(2,C), кроме одной, циклической группы нечетного порядка) будут содержать подгруппу порядка $2\{\pm I_2\}$, так как они будут иметь четный порядок, а $-I_2$ – единственный элемент SU(2) с порядком 2:

Бинарные многогранные группы. Пусть H будет вещественной алгеброй кватернионов с базой (1,i,j,k). Норма кватерниона $q=a\cdot 1+b\cdot i+c\cdot j+d\cdot k$ равна $N(q):=a^2+b^2+c^2+d^2$, $a,b,c,d\in\mathbb{R}$. Пусть $S^3$ – трехмерная сфера кватернионов длины 1, а H – трехмерное векторное подпространство чистых кватернионов (т.е. a=0). При $q\in S^3$ действие сопряжением $\varphi(q):H\to H$, $x\to q\cdot x\cdot q^{-1}$ является изометрией. Так как группа S изоморфна SU(2) по отождествлению

$$q=\begin{pmatrix}a+ib & c+id\\ -c+id & a-ib\end{pmatrix} \quad (13)$$

получается точная последовательность

$$0\to\{\pm 1\}\to SU(2)\to SO(3,R)\to 0. \quad (14)$$

Для любой конечной подгруппы $G\subset SO(3,R)$ прообраз $G':=\varphi^{-1}G$ называется бинарной полиэдральной группой. Это конечная подгруппа группы SU(2) или, что то же самое, с точностью до сопряжения группы $SL(2,\mathbb{C})$:

• бинарные циклические группы $Cn^* \cong C_{2n}$ имеют порядок 2n;

• бинарные диэдральные группы $D_n^*$имеют порядок 4n;

• бинарная тетраэдрическая группа T* имеет порядок 24;

• бинарная октаэдрическая группа O* имеет порядок 48;

• бинарная группа икосаэдра eI имеет порядок 120.

1. Пусть $G \subset SL(2,C)$ конечна, являющаяся группой линейных преобразований $C^2$ с определителем 1, которая отображает

$$(z_1, z_2) \in C^2 в\ (az_1 + bz_2, cz_1 + dz_2) \in C^2,$$

где

$$g = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \in G.$$

Пусть $G^* \subset SL(2,C)$ комплексно сопряженна группе G, определенная группой, элементы которой отображают $(z_1, z_2) \in C^2$ в $(\overline{az_1} + \overline{bz_2}, \overline{cz_1} + \overline{dz_2})$, где $g = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \in G$ (очевидно, что G изоморфна G*). Тогда получаем $\overline{G} \subset SO(3)$ конечную заменой переменных: X,Y,Z, билинейные по $z_1, z_2, \overline{z}_1, \overline{z}_2$.

2. Пусть

$$S^2 = (x_1, x_2, x_3) \in R^3 : {x_1}^2 + {x_2}^2 + {x_3}^2 = 1 -$$

единичная сфера в $R^3$, для каждого поворота $\overline{g} \in \overline{G} \subset SO(3)$ имеется ось вращения L, которая пересекает сферу в двух точках $P_1$,-$P_1$. Все точки соответствующих вращений, скажем, $\{P_1,\ldots,P_k\}$, при каждом повороте $\overline{g} \in \overline{G}$ либо вершины правильного многогранника (как на рисунках), вершины плоского многоугольника, или есть только одна ось вращения.

3. Всего существует только пять типов (т.е. подгруппы с точностью до сопряженности) конечных подгрупп группы SO (3) и соответствующие пять типов SL(2,C) (см. *таблицу 3*).

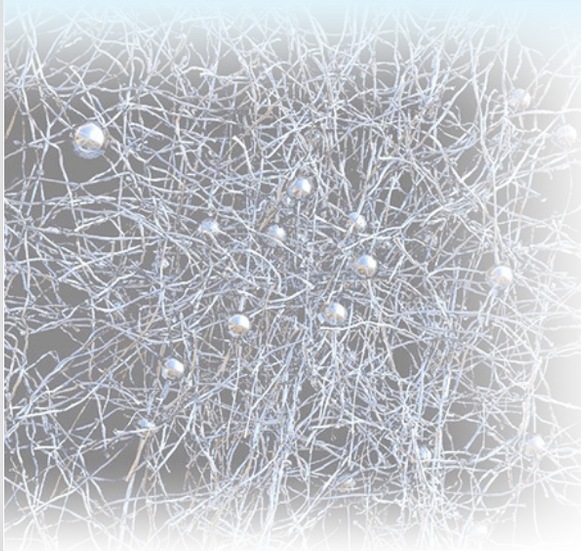
**Таблица 3**

5 конечных подгрупп группы SU(2).

| G⊂SU(2) | Представление | \|G\| |
|---|---|---|
| $C_n$ | $a^n=1$ | N |
| $D_{2n}^*$ | $a^2=b^n=(ab)^2$ | 4n |
| $A_4^*$ | $a^3=b^3=(ab)^2$ | 24 |
| $S_4^*$ | $a^3=b^4=(ab)^2$ | 48 |
| $A_5^*$ | $a^3=b^5=(ab)^2$ | 120 |

**Литература**

1. Царьков А.Н., Смуров С.В., Волков Г.Г., Масликов А.А., Капитонов И.Ю. Симметрийно-групповые расширения аксиом квантовой физики в динамике квантовых систем// Известия Института инженерной физики, 2019. №4(54). С.84-92.
2. Волков Г.Г., Смуров С.В., Царьков А.Н. Многомерные комплексные проективные пространства в квантовой физике и квантовой информации// Известия Института инженерной физики, 2020. №4(58). С.84-94.
3. Волков Г.Г., Смуров С.В., Царьков А.Н. О проективных алгебраических многообразиях в торической геометрии и квантовой физике// Известия Института инженерной физики, 2020. №4(59). С.73-86.
4. Волков Г.Г., Масликов А.А., Смуров С.В. О генеалогическом древе квантовых состояний в торической проективной геометрии// Известия Института инженерной физики, 2020. №4(60). С.91-96.
5. 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.
6. Горбунов Д.С., Рубаков В.А. Введение в теорию ранней Вселенной: Теория горячего Большого взрыва. М.: URSS, 2020.
7. G. Volkov. Hunting for the New Symmetries in Calabi-Yau Jungles, Int.J. Mod. Phys A19 (2004) 4835-4860, hep-th/0402042. 24.
8. Dubrovskiy A., Volkov G. Ternary numbers and algebras. Reflexive numbers and Berger graphs, Adv.Appl.Clifford Algebras 17, 159-181 (2007)
9. F.Anselmo, J.Ellis, D.Nanopoulos, G.Volkov. 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) 605-698.
10. P. Candelas, A. Font. Duality between the Webs of Heterotic and type IIString Theory. hepth/ 9603170, 1996.
11. P.Aspinwall. K3 Surfaces and String Duality hep-th/9611137, 1996.
12. V.Batyrev. Dual Polyhedra and Mirror Symmetry for Calabi-Yau Hypersurfaces in Toric Varieties, J. Algebraic Geom. 3, 493, 1994.
13. Данилов В.И. Алгебраические многообразия и схемы http:// lib.mexmat.ru/ books/2865. 221-240.
14. Miles Reid. Surface cyclic quotient singularities and Hirzebruch {Jung resolutions.
15. G.Volkov. Ternary «Quaternions» and Ternary TU(3) algebra, arXiv: 1006.5627, 2010.
16. Y. Ito, M. Reid. The $McKay$ correspondence for finite subgroups in SL(3,C), HigherSpatial complex Vafieties Proc. intl. Conference, Trento, 1994, de Gruyter (1996).
17. Исаев А.П., Рубаков В.А. Теория групп и симметрий: Конечные группы. Группы и алгебры Ли. М.: URSS, 2018.
18. J.C. Serrano. Finite Subgroups of SL(2;C) and SL(3;C), Warwick univ. 2014.



УДК 004.8

# РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ЭМОЦИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ТРАЕКТОРИИ ОБУЧЕНИЯ СТУДЕНТА НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

# DEVELOPMENT OF A MODEL CONSIDERING THE INFLUENCE OF EMOTIONS ON THE FORMATION OF INDIVIDUAL TRAJECTORY OF STUDENT LEARNING BASED ON NEURAL NETWORK TECHNOLOGY

Юрий Федорович Михайлов
*кандидат педагогических наук,*
*доцент*
доцент кафедры
филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел.: +7(903)-253-83-94
E-mail: mikhayurij@yandex.ru

Анатолий Владимирович Назаренко
*почетный работник сферы образования РФ*
*доцент*
директор Учебного центра «Интеграция»
филиала «Стрела» МАИ
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,
ул. Октябрьская, д. 21
Тел.: +7 (916) 926-09-16
E-mail: mai-Serpuhov@mail.ru

**Аннотация**
В статье приводится описание подхода по формированию модели учета влияния эмоций на формирование индивидуальной траектории изучения студентом некоторой предметной области знаний с помощью искусственной нейронной сети.
**Ключевые слова:** эмоции, активные нейронные сети, вектор параметров оценки уровня эмоций, усвоения знаний дидактической единицы, интеллектуальная обучающая система.

**Summary**
The article describes the approach to the formation of the assessment of individual trajectory of studying a certain subject area knowledge through a hybrid artificial neural network.
**Keywords:** the vector of the parameters of assessment of quality of learning, fuzzy neural networks, intelligent training system.

## Введение

Актуальным с точки зрения личностно ориентированного обучения является понятие индивидуальной траектории изучения некоторой предметной области знаний. Формирование индивидуальной траектории изучения некоторой предметной области знаний является задачей со множеством неопределенных параметров, поэтому предлагается для оценки результатов ее решения применять искусственную нейронную сеть. Важной задачей в данном случае является правильный подход к каждому студенту, а также оценка степени понимания материала, заинтересованности студента в изучаемой области знаний. Для этого необходимо использование систем, позволяющих моделировать поведение субъектов образовательного процесса в зависимости от текущего состояния учебного процесса и эмоционального состояния студента. Модуль распознавания состояния студента на основе нейронной сети должен включать информацию о различных эмоциональных и психологических состояний человека, их особенности, а также анализ систем и нейронной сети для распознавания образов. Для решения отмеченных проблем чрезвычайно полезным может быть продолжение и развитие компьютерного моделирования активных нейронных сетей.

## Разработка модели учета влияния эмоций на формирование индивидуальной траектории обучения студента на основе нейросетевых технологий

Сложность современных технологических процессов, переход на ФГОС третьего поколения предъявляет повышенные требования к образовательным технологиям, и требуют адекватных изменений в сфере образования. В этой

связи все более актуальными становятся технологии инновационного обучения, основанные на формировании индивидуальной траектории обучения студента.

Важной задачей в данном случае является правильный подход к каждому студенту, а также оценка степени понимания материала, заинтересованности студента в изучаемом вопросе.

Распознавание эмоционального состояния системы взаимодействия преподавателя и студента должно включать информацию о различных методиках и языках, позволяющих описывать и моделировать процесс взаимодействия параллельных систем: преподавателя и студента. Модуль распознавания состояния студента на основе нейронной сети должен включать информацию о различных эмоциональных и психологических состояний человека, их особенности, а также анализ систем и нейронной сети для распознавания образов [6].

Мы рассматриваем эмоции как один из механизмов для мотивации обучения и планирования учебной деятельности, делая упор на обучении, как основе для организации поведения на занятии. Что касается мотивации, то надо иметь в виду, что мотивация базируется отчасти на инстинктивных процессах, а отчасти, является результатом обучения [8].

Средству обучения, функционирующему на базе информационных и коммуникационных технологий, при необходимости [5] можно частично передать функции обучающего: контроль результатов обучения; предоставления заданий, адекватных уровню обучающегося. Индивидуальная траектория изучения студента выражает цель обучения и содержит информацию о состоянии знаний обучаемого, его эмоциях.

Программа дисциплины строится по модульному принципу, разработанному и представленному в монографии доктора педагогических наук О.А. Козлова «Теоретико-методологические основы информационной подготовки курсантов военных учебных заведений» [2].

В каждом модуле выделяются элементы знаний – дидактические единицы (ДЕ), представленные в учебной программе, устанавливаются структурные и семантические связи между элементами и разрабатываются семантические модели знаний для этих модулей. Связи между элементами знаний реализуются по гипертекстовой технологии, в виде ссылок. В качестве ссылки берется ключевое слово, терм, понятие, которое присутствует в структурно связанных между собой элементах знаний [4].

Влияние эмоций на студента проявляется в ситуации, когда студент должен осуществить переход от усвоения одной дидактической единице к другой. Студент должен сменить сценарии предъявления и усвоения новых знаний. Сменить процесс усвоения, переключить процесс предъявления. Перейти от усвоения одной дидактической единицы к другой дидактической единице. Переключение процессов или смена дидактических единиц требует активизации гиперссылки, на что уходит определенное время $t_{перекл}$.

Назовем это время в нормальной рабочей обстановке, в обстановке наличия мотивации к изучению, оптимальным временем переключения. В течение этого промежутка времени мы считаем, не происходит потеря знаниевой информации из сознания студента.

Однако, наличие эмоций в сознании студента, вносит изменения в мыслительный процесс. Студент, находясь во власти эмоций, отвлекается от процесса усвоения знаний, прерывает процесс усвоения знаний. Он находится во власти эмоций, его сознание не воспринимает знаниевую информацию, и не активизирует гиперссылку. Возникает задержка во времени для переключения дидактических единиц. Временная задержка в процессе перехода от изучения, усвоения одной дидактической единицы (ДЕ) к усвоению другой ДЕ.

Задержка во времени, ее числовое значение, величина отклонения от оптимального времени переключения сигнализирует о факте появления эмоций в сознании студента.

Временной интервал формирует величину входного вектора, который запускает искусственную нейронную сеть (ИНС) формирования эмоционального состояния студента, и оценки этого состояния. Значение величины оценки эмоционального состояния вызывает процедуру управления характером предъявления содержания дидактических единиц.

Управление предполагает внедрение мультимедийного контента в содержание ДЕ [5]. Использование релаксационных, расслабляющих сценариев урока и после этого, акцентирующих, мобилизационных сценариев.

Характер сценария определяется значением результата работы ИНС.

Мы считаем, что необходимо вывести студента из эмоционального плена, порабощения. Надо нейтрализовать эмоции, влияние эмоций на характер процесса усвоения знаний [6]. Погасить задержку во времени переключения сценариев предъявления содержания дидактических единиц. Возможные пути преодоления эмоций [9]:

- предложить выбор фотографий;
- или цветных изображений;
- выбор музыкальных фрагментов;

- нарисовать геометрическую фигуру.

Варианты ответов формируют четырехэлементный входной вектор для нейронной сети. Предлагается сделать это с целью создания комфортного интерфейса для последующей работы, продолжения изучения учебного материала.

Предлагается применить активные ИНС А-сети для решения поставленной проблемы [8]. Эти ИНС позволяют сформировать эмоциональную модель студента и вычислить величину эмоционального погружения студента – ЭмП. Эта величина увязана с временем задержки переключения сценария предъявления ДЕ – $t_{задер}$ и временем оптимального, без эмоций, переключения $t_{оптим}$

$$t_{задер} = t_{перкл} - t_{оптим} \quad (1)$$

Для активизации работы ИНС можно установить, что для четырех видов эмоций значения вариантов погружения следующие [8]:

- радость – 0,4;
- грусть – 0,2;
- безразличие – 0,15;
- злость – 0,25.

В дальнейшем, в ходе экспериментальной настройки ИНС эти значения могут быть скорректированы.

Вариант модели учета влияния эмоций на формирование индивидуальной траектории обучения студента на основе нейросетевых технологий приведен на *рисунке 1*.

В зависимости от текущего уровня знаний по изучаемой дисциплине, движение по траектории изучения дидактической единицы можно разбить на три основных направления. Возврат назад по траектории к предыдущему дидактическому элементу изучаемой дидактической единицы учебного курса, если обучаемый неудовлетворительно справился с предлагаемыми тестовыми заданиями по изучаемой теме или разделу. Движение вперед к новому дидактическому элементу изучаемой дидактической единицы, если обучаемый справился с предлагаемыми тестовыми заданиями. Движение вперед к новой дидактической единице учебного материала, в случае если предыдущая тема или раздел учебного курса были освоены на хорошем или отличном уровне. Каждое выделенное направление движения по индивидуальной траектории изучения включает несколько вариантов, позволяющих индивидуализировать и дифференцировать процесс обучения.

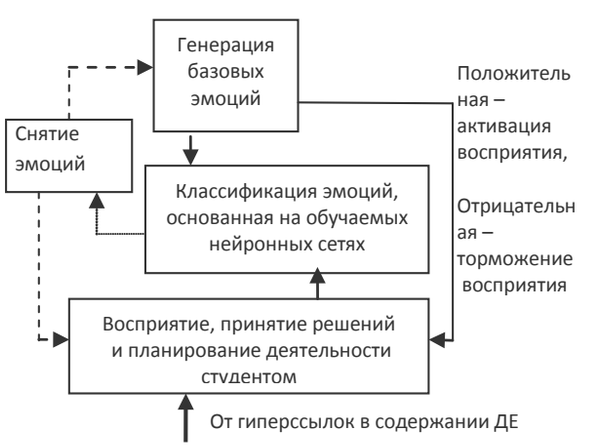



**Рис. 1.** Общая схема предлагаемой модели

Модель активной нейронной сети строится, с использованием в ее архитектуре постоянной внутренней задачи, состоящей в необходимости непрерывного поддержания оптимальных функциональных состояний нейронов и требующей их постоянной активности. Внутренняя задача, во-первых, возникает как следствие отклонения от оптимума функциональных состояний не работающих (не возбуждающихся) нейронов за счет появления у студента эмоций. Решается эта задача, при групповом взаимовозбуждении нейронов, за счет того, что эмоции изменяются. Внутренняя задача возникает при постановке внешней задачи восприятия или поведения, сводящейся, в конечном счете, к внешнему возбуждению какой-то группы нейронов сети. Внешняя задача, в виде эмоций, нарушает режим общей равномерной оптимизации и приводит к отклонению от оптимума функциональных состояний нейронов.

Решение задачи должно приводить к восстановлению режима оптимизации, что должно улучшать функциональное состояние нейронов сети. Таким образом, необходимость решения задачи не задается мозгу извне, а становится его внутренней целью. Направленные на оптимизацию состояния структурные перестройки нейронной сети должны состоять в образовании синергических взаимосодействующих групп нейронов [8]. Эти группы (ансамбли нейронов) становятся основой информационной нейронной модели проблемной среды.

Анализ литературы [3,7,8] позволил предложить для реализации схемы активной нейронной сети с возвратным торможением схему на основе классического трехслойного перцептрона. Так же, как в перцептроне, разделение пересекающихся на входном уровне информационных воздействий происходит на уровне групп нейронов первого слоя и связей, идущих к нейронам от сенсорных элементов. Принципиальное отличие – возвратное торможение и накапливающаяся неустойчивость нейронов, вызванное проявлением эмоций. Последнее лежит в основе обучения и свойства активности. В опи-

санной трехслойной сети возможно запоминание и спонтанное воспроизведение временных последовательностей, т.е. возможны ассоциации по смежности во времени.

Для моделирования процедур возвратного торможения предлагается использовать искусственные нейроглиальным сети (ИНГС), в которых глиальные клетки являются такой же частью сети, как и нейроны [10], что проиллюстрировано на *рисунке 2*.

Поток эмоциональной информации через глии приводит к модификации весов связей между нейронами, что приводит к ожидаемой блокировке обучения. В частности, с помощью введения специально подобранной системы глиальных клеток, в многослойный перцептрон, он может быть расширен таким образом, чтобы он обучался методом обратного распространения ошибки без всякого внешнего алгоритма.

Итак, прохождение сигнала через некоторые синапсы влияет не на активность нейронов, а на проводимость других синапсов. Это означает, что «веса связей» между нейронами могут меняться не только медленно в процессе обучения, но и динамически, под влиянием текущей информации эмоций.

От нейронов первого слоя на нейроны второго слоя образуются только возбуждающие связи. От глиальных клеток первого слоя на глиальные клетки второго слоя образуются только тормозящие связи. В физиологии подобные схемы взаимодействия нейронов называют структуры с возвратным торможением [8].

В отсутствие эмоций тормозящая связь, идущая к нейрону первого слоя от элемента второго слоя, ничем не отличается от связей внутри

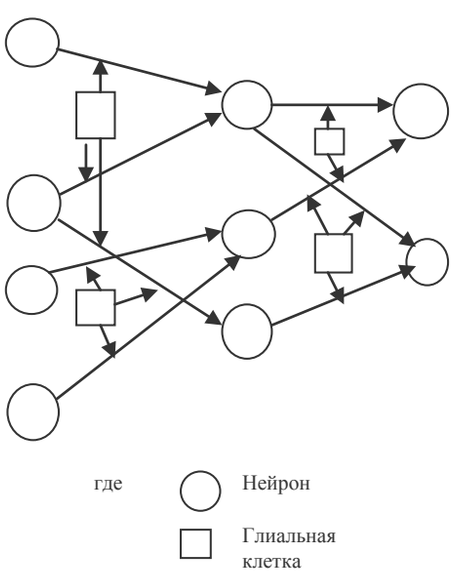



**Рис. 2.** Модель нейронной сети с торможением

первого слоя, и формируемый ею потенциал входит в алгебраическую сумму потенциалов нейрона, что соответствует стабильному процессу усвоения знаний. При наличие эмоций тормозящая связь, идущая к нейрону первого слоя от элемента второго слоя, полностью запрещает срабатывание нейрона на время уменьшения создаваемого ею тормозного потенциала до некоторой величины. Все это время происходит независимая суммация всех других создаваемых на нейроне потенциалов.

### Заключение

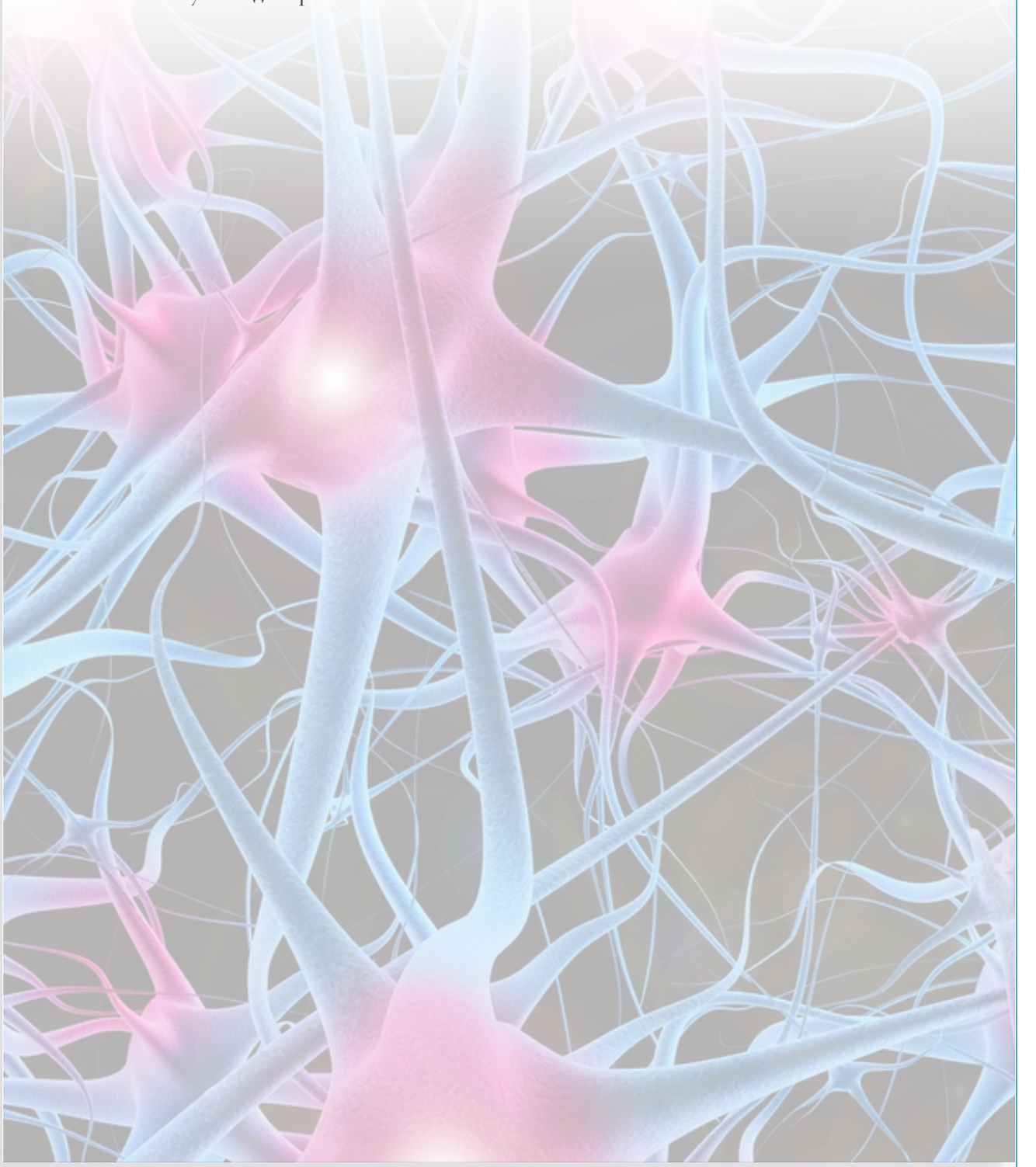
Интеллектуальная информационная система организации учебного процесса, на основе активной нейронной сети с возвратным торможением, позволяет учитывать влияние эмоций студента на формирование индивидуальной траектории изучения студентом, некоторой предметной области знаний. Сеть сохраняет, анализирует и объединяет результаты контроля эмоций, сформированные на основе учета частоты срабатывания гиперссылок. По результатам контроля формируется мультимедийный контент для содержания дидактических единиц модуля знаний, для нейтрализации эмоций.

В данной статье предложен метод контроля индивидуальной траектории изучения студентом некоторой предметной области знаний, с помощью активной нейронной сети с возвратным торможением, описывающих состояние и поведение студента во время изучения дидактической единицы модуля знаний.

### Литература

1. Козлов О.А. Развитие методической системы обучения информатике курсантов военно-учебных заведений Министерства обороны Российской федерации. Дисс.… докт. пед. наук. Серпухов, 1999. 369 с.
2. Козлов О.А. Теоретико-методологические основы информационной подготовки курсантов военно-учебных заведений. Монография. М.: МО, 2001. 328 с.
3. Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. М.: Горячая линия-Телеком, 2001. 198 с.
4. Михайлов Ю.Ф. Технология информационной подготовки курсантов в условиях моделирования экстремальных ситуаций профессиональной деятельности. Дисс.… канд. пед. наук. Москва. 2001. 168 с.
5. Роберт И.В. Теория и методика информатизации образования (психолого-педагогический и технологический аспекты). М.: ИИО РАО, 2009. 234 с.

6. Рабинович М.И., Мюезинолу М.К. Нелинейная динамика мозга: эмоции и интеллектуальная деятельность // Успехи физических наук, 2010. Т.180. №4. С.371-387.
7. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. Пер. с польск. И.Д. Рудинского. М.: Горячая линия-Телеком, 2006. 452 с.
8. Шамис А.Л. Пути моделирования мышления. Активные синергетические сети, мышление и творчество, формальные модели поведения и «распознавания с пониманием». М.: Едиториал УРСС: [КомКнига], 2006. 332 с.
9. http://www.intuit.ru/studies/professional_skill_improvements/ 1598/ courses/ 423/ lecture/ 9637 Активные нейронные модели (А-сети).
10. http://aideus.ru. AIDEUS – Сильный Искусственный Интеллект.



УДК 615.2, 615.31

# К ВОПРОСУ О РАДИОПРОТЕКТОРНЫХ СВОЙСТВАХ ПРЕПАРАТА ТАМЕРОН

# ON THE ISSUE OF RADIOPROTECTIVE PROPERTIES OF TAMERON

Артём Михайлович Ермаков
*кандидат биологических наук*
ведущий специалист-исследователь
МОУ «ИИФ»
ведущий научный сотрудник
Институт теоретической и
экспериментальной биофизики РАН
Адрес: 142290, Московская обл.,
г. Пущино, ул. Институтская, д. 3
Тел. +7 (4967) 73-94-28
E-mail: ao_ermakovy@rambler.ru

Ольга Юрьевна Антонова
*кандидат биологических наук*
ведущий химик – технолог
МОУ «ИИФ»
научный сотрудник
Институт теоретической и
экспериментальной биофизики РАН
E-mail: olga.antonova.iteb@gmail.com

Елена Александровна Царькова
Генеральный директор
Медицинская клиника «АксиоМед»
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,
ул. 2-я Московская, д. 6, к. 5, помещ. 4А
Тел.: +7 (4967) 12-84-88
E-mail: axiomed@mail.ru

Ольга Юрьевна Кочеткова
старший специалист – исследователь
МОУ «ИИФ»
научный сотрудник
Институт теоретической и
экспериментальной биофизики РАН
E-mail: o.y.kochetkova@gmail.com

Кристина Александровна Каменских
химик-разработчик
МОУ «ИИФ»
младший научный сотрудник
Институт теоретической и
экспериментальной биофизики РАН
E-mail: kristina.kamensk@mail.ru

Данила Денисович Колманович
химик-технолог
МОУ «ИИФ»
младший научный сотрудник
Институт теоретической и
экспериментальной биофизики РАН
E-mail: kdd100996@mail.ru

**Аннотация**

В статье рассматривается проблема возможности применения препарата **ТАМЕРОН**, производимого в Институте инженерной физики, в качестве эффективного радиопротекторного средства. Была проведена серия биологических исследований на примере модели регенерирующих планарий и культуры стволовых клеток человека. В ходе работы показано, что **ТАМЕРОН** защищает от радиационного поражения ДНК клеток, значительно ускоряя при этом репаративные процессы, а также способствует выживанию стволовых клеток и сохранению регенераторного потенциала. Дальнейшие исследования позволят выяснить механизмы активности препарата **ТАМЕРОН** при облучении биологических объектов ионизирующим излучением, а также выявить наиболее эффективные схемы его применения в качестве радиопротектора.

**Ключевые слова: ТАМЕРОН**, аминодигидрофталазиндион натрия, ионизирующее излучение, радиопротектор, антиоксидант, активные формы кислорода.

**Summary**

The article deals with the problem of the possibility of using **TAMERON**, produced at Institute of Engineering Physics, as an effective radioprotective agent. A series of biological studies was carried out using the model of regenerating planarians and human stem cell culture as an example. In the course of the work, it was shown that **TAMERON** protects cells from radiation damage to DNA, while significantly accelerating reparative processes, and also contributes to the survival of stem cells and the preservation of regenerative potential. Further studies will make it possible to elucidate the mechanisms of activity of the drug **TAMERON** during irradiation of biological objects with ionizing radiation, as well as to identify the most effective schemes for its use as a radioprotector.

**Keywords: TAMERON**, aminodihydrophthalazinedione sodium salt, ionizing radiation, radioprotector, antioxidant, reactive oxygen species.

Как было показано ранее [2], производимый в МОУ «Институт инженерной физики» препарат **ТАМЕРОН** обладает значительной антиоксидантной активностью, проявляемой как на уровне прямого химического взаимодействия активного начала препарата – аминодигидроф-

талазиндиона натрия со свободными радикалами кислорода и азота, так и посредством активации сигнального каскада транскрипционного фактора NRF2 [1,2]. Стабилизация этого фактора за счет подавления окисления белка приводит к активации транскрипции генов, ответственных за антиоксидантную защиту клетки – глутатионпероксидаз, глутатионредуктаз, тиоредоксинредуктаз и других [3].

Известно, что основным повреждающим фактором при воздействии ионизирующего излучения на живой организм и его клетки являются свободные радикалы, образующиеся при ионизации воды [4]. Поэтому действие распространенных радиопротекторных препаратов (например, ацетилцистеина, амифостина) направлено как раз на нейтрализацию свободных радикалов за счет химического взаимодействия с ними (скавенжинга) [5,6]. Учитывая высокую антиоксидантную активность препарата **ТАМЕРОН**, нами было выдвинуто предположение о том, что он может выступать в качестве эффективного радиопротекторного средства. Это предположение было проверено в серии исследований на примере регенерирующих планарий и культуры мезенхимальных стволовых клеток человека.

## Материалы и методы

### *Регенерирующие планарии*

В работе были использованы планарии *Schmidtea mediterranea*, бесполая лабораторная раса плоских червей. Планарий содержали в «искусственной прудовой воде» (смесь водопроводной и дистиллированной воды в пропорции 2:1) при комнатной температуре, кормили раз в неделю личинками двукрылых. Для экспериментов отбирали животных длиной около 10 мм и прекращали их кормление за 7 дней до опытов. Планарий за сутки перед облучением рентгеном помещали в раствор препарата **ТАМЕРОН** в концентрации $10^{-3}$ М, далее облучали рентгеновским излучением в дозе 10 и 15 Гр. После облучения производили ампутацию 1/5 части тела планарий, содержащей головной ганглий, наблюдалась регенерация отсеченной части тела и отслеживали рост головной бластемы. Динамику роста регенерационной почки (бластемы) планарий оценивали методом прижизненной морфометрии. Метод базируется на регистрации фотоконтраста между старыми (пигментированными) и новыми (прозрачными) частями тела. Молодая формирующаяся бластема в первые дни не покрыта пигментным эпителием, что позволяет четко выделить ее область на фоне пигментированной остаточной старой части тела [7]. Стандартные изображения регенерирующих планарий получали на 3 день после декапитации с помощью комплекса, включающего фотокамеру MRc (Carl Zeiss, Германия), смонтированную на окуляре бинокулярного микроскопа МБС-10.

Программой Plana 4.4 (разработано А.А. Деевым (ИТЭБ РАН)), определяли общую площадь тела животного и площадь бластемы. Количественным критерием роста служил индекс регенерации R=s/S, где s – площадь бластемы, S – площадь всего тела регенеранта. Каждое из измеряемых значений R – результат усреднения измерений по 30 животным.

### *Культура клеток человека*

Эксперименты проводились на культуре мезенхимальных стволовых клеток (МСК), которые были выделены из зачатка третьего моляра, извлеченного по ортодонтическим показаниям у здорового 16-летнего пациента. Клетки экстрагировали в среде DMEM/F12 (ПанЭко, Россия), содержащей 200 ЕД/мл пенициллина и 200 мг/мл стрептомицина (Life Technologies, США), шприцем, вставленным в верхушку зуба, с последующей обработкой 0,25% трипсином + 0,02% ЭДТА (Life Technologies) Technologies, США) в течение 30 мин при 37°С. Выделенные клетки центрифугировали в течение 2 мин при 1500 об/мин и ресуспендировали до состояния единичных клеток в культуральной среде, состоящей из DMEM/F12 (1:1; Life Technologies) с добавлением 10% эмбриональной бычьей сыворотки (ЭБС). Полученный раствор переносили во флаконы по 25 мл и культивировали в атмосфере 5% $CO_2$ при 37°С с добавлением 10% ЭБС (HyClone), 100 ЕД/мл пенициллина/стрептомицина, 2 мМ L-глутамина в DMEM (ПанЭко, Россия). При достижении состояния субконфлюэнтных клеток культивируемые клетки обрабатывали 0,25% раствором ЭДТА/трипсин и добавляли во флаконы объемом 75 $см^2$ в соотношении 1:3. Клетки культивировали в среде DMEM/F12 («ПанЭко», Россия) с добавлением 10% ЭБС, 100 ЕД/мл пенициллина/стрептомицина и 2 мМ L-глутамина. В нашем исследовании использовали культуры клеток 3-4 пассажей.

### *Облучение планарий и клеточных культур рентгеном*

Облучение планарий и культуры клеток проводили с использованием терапевтического рентгеновского аппарата РУТ-15 (Мосрентген, Россия). Для планарий использовали дозы 10 и 15 Гр, для клеточных культур – 1,5 Гр при мощности дозы 1 Гр/мин, напряжении 200 кВ, фокусном расстоянии 37,5 см и токе 20 мА. Планарий облучали в чашках Петри на слое фильтроваль-

ной бумаги, смоченной водой. Клетки облучали в 96 луночных культуральных планшетах или культуральных флаконах.

***Анализ двунитевых разрывов ДНК***

Клетки высевали с плотностью $2*10^4$ см$^2$, культивировали 16 часов (overnight) и вносили **ТАМЕРОН** в различных концентрациях (0,25, 0,5 и 1 мМ). Далее клетки культивировались в присутствии препарата в течение 24 часов и подвергались облучению рентгеновскими лучами в дозе 1,5 Гр. Анализ количества двунитевых разрывов ДНК проводили через 1 и 4 часа после облучения. После облучения клетки дважды промывали фосфатно-солевым буфером (PBS, pH 7,4). Затем клетки фиксировали 4% раствором параформальдегида в PBS в течение 10 минут, пермеабилизировали с использованием 0,3% раствора Triton X-100 в PBS в течение 5 минут, тщательно промывали PBS, блокировали в 1% BSA в PBS в течение 30 минут при комнатной температуре. Для иммуноокрашивания использовали первичные антитела, моноклональные мышиные γH2AX (ab195188 Recombinant, Anti-gamma H2A.X (фосфо S139), (Alexa Fluor® 488), Abcam)). Получение изображений очагов репарации ДНК проводилось с помощью инвертированной микроскопии Zeiss Axiovert Observer 200M (Carl Zeiss Microscopy, Йена, Германия) с использованием объектива 63x. Анализ клеток, окрашенных γH2AX, проводили с помощью подключаемого модуля FindFoci ImageJ для автоматического распознавания очагов. Для каждой экспериментальной группы анализировалось не менее 20 полей зрения.

***Статистическая обработка экспериментальных данных***

Статистический анализ проводился программой GraphPad Prism 8.0. Все экспериментальные данные были представлены как среднее значение ± стандартное отклонение (SD) и были проверены на наличие статистически значимых различий с использованием однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA). Различия между экспериментальными группами считали статистически значимыми при значении $p<0,05$.

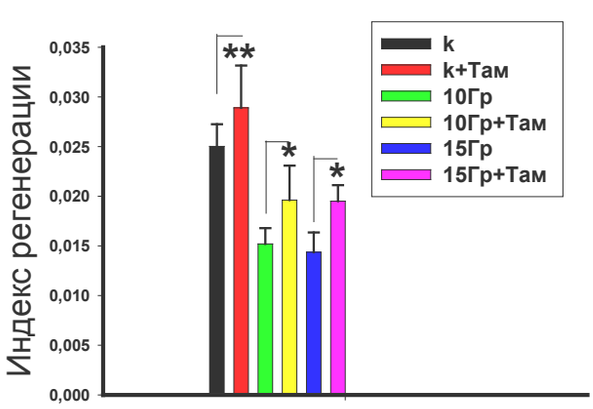
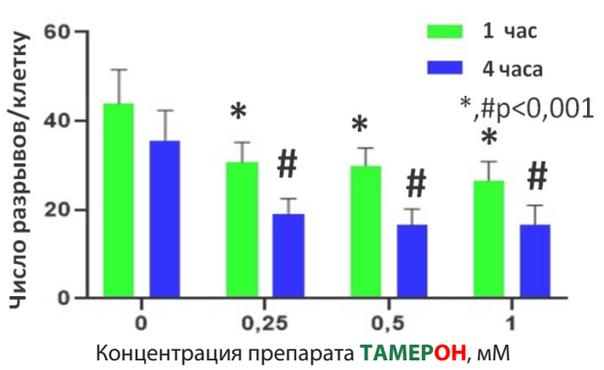


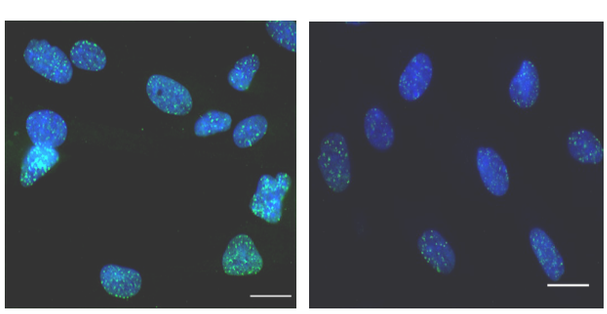

**Рис. 1**. Площадь бластемы планарий на 3 сутки регенерации в контроле и после облучения в дозе 10 и 15 Гр без препарата **ТАМЕРОН** (Там) и в присутствии препарата в концентрации $10^{-3}$ М.*p<0,001, **p<0,01

**Результаты и обсуждение**

Результаты исследования регенерации планарий после облучения рентгеном без препарата и с препаратом **ТАМЕРОН** представлены на *рисунке 1*. Стоит отметить, что сам препарат в концентрации $10^{-3}$ М стимулирует рост бластемы по сравнению с контролем на 15%. Воздействие ионизирующего излучения приводило к значительному снижению скорости регенерации головной части планарий. Так в частности облучение в дозе 10 и 15 Гр ингибировало рост бластемы в среднем на 40%, тогда как присутствие препарата **ТАМЕРОН** приводило к тому,




а




б

**Рис. 2**. Радиопротекторные свойства препарата **ТАМЕРОН**, тест на двунитиевые разрывы ДНК после рентгеновского облучения в дозе 1,5 Гр мезенхимальных стволовых клеток (МСК); а – подсчет количества фокусов разрывов ДНК в культивируемых клетках через 1 и 4 часа после облучения рентгеном в дозе 1,5 Гр в контроле и в присутствии препарата, б – визуализация разрывов ДНК в ядрах МСК на микрофотографиях. Линейка – 10 мкм; *# – отличие от облученного контроля (без препарата)

что бластема была больше, чем у облученных животных без препарата в среднем на 30%.

Анализ количества двунитевых разрывов ДНК методом иммуноокрашивания после облучения стволовых клеток человека рентгеновскими лучами в дозе 1.5 Гр представлен на *рисунке 2*. Предобработка МСК человека препаратом **ТАМЕРОН** во всех исследованных концентрациях (0.25-1 мМ) через 1 час после облучения выявил достоверное снижение количества двунитевых разрывов ДНК по сравнению с необработанным контролем ($p \leq 0.0001$ для 0.25 мМ, $p \leq 0.0012$ для 0.5 мМ, $p \leq 0.0001$ для 1 мМ). При этом и через 4 часа после облучения наблюдалась значимая активация репаративных процессов ДНК в присутствии препарата в диапазоне всех исследуемых концентраций ($p \leq 0.001$ для 0.25 мМ, $p \leq 0.001$ для 0.5 мМ, $p \leq 0.001$ для 1 мМ).

Ранее нами было показано, что регенерирующие планарии могут служить эффективной моделью для изучения радиопротекторных свойств фармакологических препаратов [8]. При воздействии ионизирующего излучения у этих планарий происходит гибель стволовых клеток, которые обеспечивают регенеративные процессы, поэтому рост бластемы значительно замедляется [9]. Очевидно, что присутствие препарата **ТАМЕРОН** способствует сохранению стволовых клеток в теле животных при воздействии ионизирующего изучения, и это сопровождается более быстрой регенерацией головного конца планарий.

Эту гипотезу подтверждают данные, полученные на культуре стволовых клеток человека. Так в присутствии препарата **ТАМЕРОН** в МСК после воздействия ионизирующего излучения наблюдали более быстрые репаративные процессы разрывав ДНК. Очевидно, что препарат за счет антиоксидантной активности значительно снижает количество свободных радикалов, которые повреждают ДНК. При этом не стоит преуменьшать роль ферментных систем антиоксидантной защиты, которые активирует **ТАМЕРОН** посредством транскрипционного фактора NRF2, о чем могут свидетельствовать эффекты значительных репарационных процессов на 4 час после облучения клеток рентгеном [1]. Известно, что за счет особой структуры хроматина, стволовые и активно делящиеся клетки являются наиболее чувствительными к ионизирующему излучению [10]. Поэтому ускорение репаративных процессов и стабилизация хроматина ядра на фоне радиопротекторного действия **ТАМЕРОН** приводят к повышенной выживаемости стволовых клеток млекопитающих и планарий.

Таким образом, предсказанная радиопротективная эффективность препарата **ТАМЕРОН** была продемонстрирована в серии исследований на примере модели регенерирующих планарий и культивируемых стволовых клеток. Дальнейшие исследования позволят выяснить механизмы активности препарата при облучении биологических объектов ионизирующим излучением, а также выявить наиболее эффективные схемы его применения в качестве радиопротектора.

**Литература**

1. Scofield V.L., Yan M., Kuang X., Kim S.J., Wong P.K. The drug monosodium luminol (GVT) preserves crypt-villus epithelial organization and allows survival of intestinal T cells in mice infected with the ts1 retrovirus // Immunol Lett., 2009. 122(2). Pp.150-158.
2. Ермаков А.М., Царькова Е.А. К вопросу об антиоксидантной активности препарата Тамерон // Известия Института инженерной физики, 2020. №3(57). С.103-106.
3. Tonelli C., Chio Ch., Tuveson D. Transcriptional regulation by Nrf2 // Antioxidants & Redox Signaling, 2018. Pp.1727-1745.
4. Kawamura K., Qi F., Kobayashi J. Potential relationship between the biological effects of low-dose irradiation and mitochondrial ROS production // J Radiat Res., 2018. 59 (suppl_2). Pp.91-97.
5. Kouvaris J.R., Kouloulias V.E., Vlahos L.J. Amifostine: The First Selective-Target and Broad-Spectrum Radioprotector // The Oncologist, 2007. Vol.12(6). Pp.738-747.
6. Reliene R., Pollard J.M., Sobol Z., Trouiller B., Gatti R.A., Schiestl R.H. N-acetyl cysteine protects against ionizing radiation-induced DNA damage but not against cell killing in yeast and mammals // Mutat Res., 2009. 665(1-2). Pp.37-43.
7. Ermakova O.N., Ermakov A.M., Tiras H.P. Lednev V.V. The effect of melatonin on the regeneration of planaria Girardia tigrina // Ontogenesis, 2009. №6. Pp.466-469.
8. Ermakov A.M., Kamenskikh K.A., Ermakova O.N., Blagodatsky A.S., Popov A.L., Ivanov V.K. Planarians as an In Vivo Experimental Model for the Study of New Radioprotective Substances // Antioxidants. 2021, 10(11). P. 1763.
9. Scimone M.L., Kravarik Kellie M., Lapan Sylvain W., Reddien Peter W. Neoblast Specialization in Regeneration of the Planarian Schmidtea mediterranea // Stem cell reports, 2014. 3(2). Pp.339-352.
10. Fabbrizi M.R., Warshowsky K.E., Zobel C.L. et al. Molecular and epigenetic regulatory mechanisms of normal stem cell radiosensitivity // Cell Death Discovery, 2018. 4. P.117.

# AUTHORS


**Amelenkov Andrey A.** Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Head of Research, «MGLU». Moscow, Aviamotornaya st., 8a.

**Antonova Olga Y.** Candidate of Biological Sciences, Leading Chemist-Technologist Institute of Engineering Physics, Researcher Institute of Theoretical and Experimental Biophysics of the Russian Academy of Sciences. Moscow reg., Pushchino, st. Institutskaya, 3.

**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.

**Belov Yuri S.** Candidate of physical and mathematical sciences, associate professor of the Department of Computer Software, Information Technologies. Kaluga Branch of Bauman MSTU. Kaluga, St. Bazhenova, 2.

**Brodsky Maksim S.** Acting Head of Labs. Military space Academy named after A.F. Mozhaiskiy. St. Petersburg, ul. Zhdanovskaya, 13.

**Buzakin Ivan S.** Cadet. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya St., 17.

**Chirov Denis S.** Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department, «Moscow Technical University of Communications and Informatic». Moscow, Aviamotornaya st., 8a.

**Chudin Kirill S.** Assistant. Bauman State Technical University. Moscow, 2-nd Baumanskaya st., 5-1.

**Danilov Vladimir. P.** Candidate of Technical Sciences. Associate professor. Head of the Departament of the MAI Traning Center. Moscow reg., Serpukhov, st. Oktyabrskay, 21.

**Demidov Lev N.** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Business Informatics, Financial University under the Government of the Russian Federation. Moscow, Leningradsky Ave., 49/2.

**Egorov Vladislav V.** Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Ermakov Artem M.** Candidate of biological sciences. Senior Researcher. Institute of Theoretical and Experimental Biophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3. Leading researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyu l., 1a.

**Fedorova Veronica A.** Candidate of Technical Sciences, associate Professor. Bauman Moscow State Technical University. Moscow, 2-nd Baumanskaya St., 5-1.

**Gaifulin Viktor V.** Candidate of Technical Sciences, Associate professor of the department of information security, Federal state educational institution of Higher professional education Krasnodar University of the Ministry of internal affairs of the Russian Federation. Krasnodar, st. Yaroslavskaya, 128.

**Griboedova Irina A.** Student. Voronezh state university of engineering technologies. Voronezh, Revolution Av., 19.

**Kamenskikh Kristina A.** Development chemist, «Institute of Engineering Physics», junior researcher, Institute of Theoretical and Experimental Biophysics Russian Academy of Sciences. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

**Karlov Peter A.** Student. Voronezh state university of engineering technologies. Voronezh, Revolution Av., 19.

**Khodyrev Timofey B.** Adjunct. Federal state educational institution of higher education «Voronezh Institute of the Ministry of Internal affairs of the Russian Federation». Voronezh, Patriot Avenue, 53.

**Khudik Mikhail Y.** Research Assistant. Military space Academy named after A.F. Mozhaiskiy. St. Petersburg, ul. Zhdanovskaya, 13.

**Kochetkov Yuri A.** Lead employee, «Moscow Technical University of Communications and Informatics». Moscow, Aviamotornaya st., 8a.

**Kochetkova Olga Y.** Senior Specialist-Researcher Institute of Engineering Physics, Research Fellow Institute of Theoretical and Experimental Biophysics of the Russian Academy of Sciences. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

**Kolebtsev Vladimir I.** Undergraduate. Kaluga Branch of Bauman MSTU. Kaluga, St. Bazhenova, 2.

**Kolmanovich Danila D.** Chemist-technologist, Institute of Engineering Physics, junior researcher, Institute of Theoretical and Experimental Biophysics of the Russian Academy of Sciences. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

**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.

**Kolpakov Denis M.** Undergraduate. Kaluga Branch of Bauman MSTU. Kaluga, St. Bazhenova, 2.

**Kondakov Sergey E.** Candidate of Technical Sciences Associate Professor of the Department «Information Security». Bauman State Technical University. Moscow, 2-nd Baumanskaya st., 5.

**Korobkov Alexey A.** Honorary Worker of Science and High Technologies of the Russian Federation, Candidate of Technical Sciences, associate Professor, head of scientific and methodological Department. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Korshunov Maksim A.** Post-graduate. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya St., 17.

**Krakhmalev Dmitry V.** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Business Informatics, Financial University under the Government of the Russian Federation. Moscow, Leningradsky Ave., 49/2.

# AUTHORS


**Kreknin Andrey V.** Student. «Strela» branch of MAI. Moscow reg., Zhukovsky, Zhukovsky str., 8.

**Kuchmenko Tat'yana A.** Doctor of Chemical Sciences, Professor, head physical and analytical chemistry department. Voronezh state university of engineering technologies. Voronezh, Revolution Av., 19.

**Kulik Maksim V.** Senior Researcher of scientific and methodological Department. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Lesnykh Vadim N.** Junior scientist. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

**Mazin Anatoly V.** Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of «Information Security», Kaluga Branch of Bauman MSTU. Kaluga, St. Bazhenova, 2.

**Mikhailov Yuri F.** Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor. Associate Professor of the Department. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya St., 17.

**Nakonechny A.B.** Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Nazarenko Anatoliy V.** Honorary Worker of Education of the Russian Federation assistant professor. Director of the Training Center "Integration" branch "Strela" MAI. Moscow reg., Serpukhov, st. Oktyabrskay, 21.

**Panchelyuga Victor A.** Candidate of Physical and Mathematical Sciences. Senior scientist. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

**Popov Aleksandr S.** Doctor of Technical Sciences, Professor, Senior Researcher. Military space Academy named after A.F. Mozhaiskiy. St. Petersburg, ul. Zhdanovskaya, 13.

**Popov Alexandr V.** Adjunct of the Department. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya St., 17.

**Poryadina Dar'ya A.** Candidate of Chemical Sciences. Lecturer. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forse. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Rassokhin Gennady N.** Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher Senior Researcher, 4th Central Research Institute of the Ministry of Defense of Russia. Moscow reg., Korolev, md. Jubilee, st. M.K. Tikhonravova, 29.

**Ryumshin Konstantin Y.** Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher, «Moscow Technical University of Communications and Informatics». Moscow, Aviamotornaya st., 8a.

**Sadekova Al`fiya A.** Junior Researcher of scientific and methodological Department. Institute of Engineering Physics. Moscow, Leninsky Prospekt, 4.

**Sergeev Stepan S.** Head of engineering calculation group, Public Joint Stock Company «Cryogenmash». Moscow region, Balashikha, Lenin Ave., 67.

**Sholokhov Aleksei V.** Doctor of Technical Sciences, Professor. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya St., 17.

**Smorodin Anatoly I.** Honorary Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor. Professor of the E-4 Department. Bauman State Technical University. Moscow, 2-nd Baumanskaya st., 5.

**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.

**Tegentsev Ivan M.** Head of the department. Federal state institution «Main center for engineering and technical support and communications» of the Federal penitentiary service of Russia. Moscow, st. Zhitnaya, 14.

**Tkachenko Anastasiya V.** Graduate student. Assistant of the department «Information processing system». Kaluga Branch of Bauman MSTU. Kaluga, St. Bazhenova, 2.

**Tzar'kova Elena A.** General manager. Medical clinic «AxioMed». Moscow reg., Serpukhov, st. 2-nd Moscow, 6, building 5, room 4A.

**Vasilyev Valentin V.** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department C-11. Moscow Aviation Institute (National Research University), MAI, Moscow, Volokolamskoe shosse, 4.

**Vershinin Evgeny V.** Candidate of Physical and Mathematical sciences, docent. Head of «Information processing systems» Department. Kaluga Branch of Bauman MSTU. Kaluga, St. Bazhenova, 2.

**Volkov Gennadiy G.** Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor. Senior Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

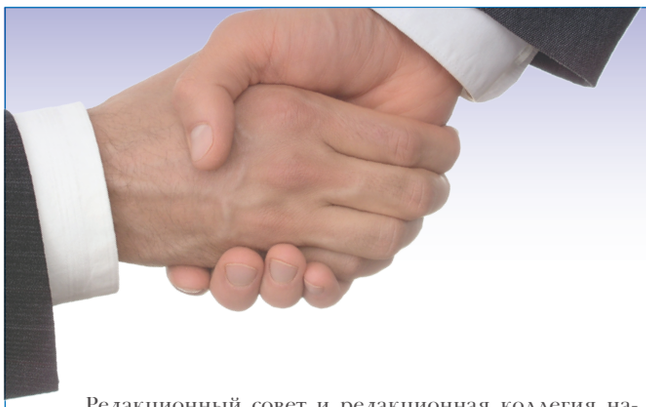
**Zelenevsky Vladimir V.** Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation Doctor of Technical Sciences, Professor, professor of the department. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forse. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Zelenevsky Yury V.** Doctor of Technical Sciences, associate professor. Researcher. Military Academy of the Strategic Missile Forse. Moscow Reg., Balashikha, Karbysheva st., 8.

**Zelentsova Ekaterina V.** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University. Moscow, 2-nd Baumanskaya st., 5.

**Zhuravlev Alexey P.** Head of laboratory. «MTUSI». Moscow, Aviamotornaya st., 8a.

**Zvonarev Vitaliy V.** Candidate of Technical Sciences, Head of laboratory – Senior Researcher VI (NI). Military space Academy named after A.F. Mozhaiskiy. St. Petersburg, ul. Zhdanovskaya, 13.



# ЭТИКА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

Редакционный совет и редакционная коллегия научно-технического журнала «Известия Института инженерной физики» придерживаются принятых международным сообществом принципов публикационной этики, отраженных, в частности, в рекомендациях Комитета по этике научных публикаций (Committee on Publication Ethics).

Все статьи, предоставленные для публикации в журнале «Известия Института инженерной физики», проходят рецензирование на оригинальность, этичность и значимость. Соблюдение стандартов этического поведения важно для всех сторон, принимающих участие в публикации: авторов, редакторов журнала, рецензентов, издателя.

## ОБЯЗАННОСТИ РЕДАКТОРА

**Редактор в своей деятельности обязуется:**

- постоянно совершенствовать журнал;
- следовать принципу свободы мнений;
- стремиться к удовлетворению потребностей читателей и авторов журнала;
- исключать влияние интересов бизнеса или политики на принятие решений об опубликовании материалов;
- принимать решения на основании принципа справедливости и беспристрастности, обеспечивать прозрачность редакционной деятельности на всех ее этапах;
- не раскрывать информацию о предоставленных материалах никому, кроме соответствующих авторов, рецензентов, других редакционных консультантов;
- оценивать рукописи исключительно по их научному содержанию;
- принимать решение о публикации материалов, руководствуясь следующими главными критериями: соответствие рукописи тематике журнала; актуальность, новизна и научная значимость представленной статьи; ясность изложения; достоверность результатов и законченность выводов. Качество исследования и его актуальность являются основой для решения о публикации;
- принимать меры для обеспечения высокого качества публикуемых материалов и защиты конфиденциальности персональной информации. При обнаружении содержательных, грамматических, стилистических и иных ошибок редакция обязуется предпринимать все меры для их устранения;
- обосновать свое решение в случае принятия или отклонения статьи;
- предоставить автору рецензируемого материала возможность для обоснования своей исследовательской позиции;
- поощрять дискуссии и предоставлять возможность для изложения точки зрения оппонентов;
- не использовать в собственных исследованиях информацию из неопубликованных материалов.

## ОБЯЗАННОСТИ ЧЛЕНОВ РЕДСОВЕТА (РЕДКОЛЛЕГИИ)

**Решение о публикации.**

Редсовет (редколлегия) журнала «Известия Института инженерной физики» являются ответственными за принятие решения о том, какие статьи будут опубликованы в журнале. Решение принимается на основании представляемых на статью рецензий

Редсовет (редколлегия) придерживаются политики журнала и действуют в рамках законных требований, поскольку несут ответственность за нарушение авторских прав.

**Конфиденциальность.**

Рецензенты или кто-либо из сотрудников редакции не должны разглашать никакую информацию о предоставленной рукописи кому-либо, кроме самого автора, рецензентов, потенциальных рецензентов, членов редакционного совета (коллегии) и издателя, поскольку она является конфиденциальной.

**Раскрытие информации и конфликт интересов.**

Неопубликованные материалы, находящиеся в предоставленной статье, не должны быть использованы в собственном исследовании научного редактора и рецензентов без специального письменного разрешения автора.

## ОБЯЗАННОСТИ РЕЦЕНЗЕНТОВ

Рецензенты оказывают помощь членам редакционного совета (редколлегии) при принятии редакционного решения, а также помогают автору усовершенствовать работу.

**Конфиденциальность.**

Любые рукописи, полученные для рецензирования, должны восприниматься как конфиденциальные документы. Они не могут быть показаны либо обговорены с другими лицами, кроме тех, которые уполномочены редакцией.

**Подтверждение источников.**

Рецензенты должны идентифицировать опубликованную работу, которая не была процитирована автором. Любое утверждение, что наблюдение, происхождение либо аргумент ранее были сообщены, необходимо сопровождать соответствующей ссылкой. Рецензент должен также донести до сведения редакции о любой существенной схожести или частичном совпадении между рукописью, которая рецензируется, и другой уже опубликованной работой, которая ему знакома.

**Раскрытие информации и конфликт интересов.**

Приватная информация или идеи, возникшие в процессе рецензирования, должны остаться конфиденциальными и не могут быть использованы в личных интересах. Рецензент не должен рассматривать рукопись, если имеет место конфликт интересов в результате его конкурентных, партнерских либо других отношений или связей с кем-либо из авторов, компаний или организаций, связанных с материалом публикации.

## ОБЯЗАННОСТИ АВТОРОВ

**Оригинальность и плагиат.**

Авторы должны гарантировать, что они написали полностью оригинальную работу. Если авторы использовали работу и/или слова других авторов, это должно быть соответственно указано и процитировано.

**Доступ к данным и сохранность.**

Автор должен быть готов обеспечить доступ к данным, связанными с материалом публикации, если таковой возможен. Во всяком случае, автор должен быть готов сохранять такие данные на протяжении разумного периода времени после опубликования.

**Многоразовая, избыточная или конкурирующая публикация.**

Автор не должен публиковать работы, которые описывают по сути одно и то же исследование, более чем один раз или более чем в одном журнале.

Предоставление рукописи более чем в один журнал одновременно означает неэтичное издательское поведение и является недопустимым.

**Подтверждение источников.**
Необходимо предоставлять должное подтверждение работ других авторов. Авторы должны процитировать публикации, которые имели значение при создании заявленной работы.

**Авторство материала.**
Авторство необходимо ограничить теми лицами, которые внесли ощутимый вклад в концепцию, проект, исполнение или интерпретацию заявленной работы. Всех, кто внес ощутимый вклад, следует внести в список соавторов.

Автор должен гарантировать, что список авторов содержит только действительных авторов и в него не внесены те, кто не имеет отношения к данной работе, а также то, что все соавторы ознакомились и одобрили окончательную версию статьи и дали согласие на ее публикацию.

**Раскрытие информации и конфликт интересов.**
Все авторы должны сообщать, если в их работе имеется финансовый либо другой конфликт интересов, который может повлиять на результаты или интерпретацию их рукописи.

**Ошибки в опубликованных работах.**
Если автор обнаружит существенную ошибку или неточность в своей опубликованной работе, его обязанность – незамедлительно сообщить об этом в редакцию журнала или издателю и сотрудничать с редакцией при исправлении ошибок.

## НАРУШЕНИЯ

При возникновении ситуации, связанной с нарушением публикационной этики со стороны редактора, автора или рецензента, требуется ее обязательное рассмотрение. Редакционный совет (редколлегия) обязана потребовать разъяснения, без привлечения лиц, которые могут иметь конфликт интересов с одной из сторон.

Если материал, содержащий значительные неточности, был опубликован, он должен быть незамедлительно исправлен в форме, доступной для читателей и систем индексирования.

# ТРЕБОВАНИЯ К АВТОРАМ СТАТЕЙ

Для публикации принимаются статьи на русском языке. Рекомендуемый объем статьи – 0,2–0,4 п.л. (8000–16000 знаков).

**Тексты** должны быть представлены:
- в электронном виде (Word 2003). Иллюстративный материал (сложные формулы, рисунки, фотографии и т.д.) кроме размещения в тексте обязательно должны предоставляться отдельными файлами!
- на бумажном носителе формата А4.

**Текст статьи** должен быть набран через 1,5 интервала (гарнитура «Times New Roman»), кегль 14.

**Простые символы и формулы не набирать в математическом редакторе!**

Напечатанный текст должен иметь поля: верхнее и левое – 2,5 см, правое и нижнее – 2 см.

Вверху первой страницы статьи размещаются:
- рубрика журнала (см. *Приложение 1*);
- УДК;
- название статьи с переводом на английский язык;
- имя, отчество, фамилия автора (авторов), ученая степень, ученое звание, должность и место работы.

**Список литературы** (**Литература**) размещается в конце статьи.

После литературы помещаются:
- список ключевых слов, краткая аннотация (на русском и английском языках).

Завершает рукопись полная информация об авторе (авторах):
- ФИО;
- ученая степень, ученое звание, должность и место работы с переводом на английский язык;
- адрес места работы, контактные телефоны, электронный адрес (по желанию автора – домашний адрес и телефон).

**Обращаем особое внимание на:**
- точность и правильность библиографического оформления списка литературы (в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008);
- выверенность статьи в компьютерном наборе;
- полное соответствие файла на электронном носителе и бумажного варианта.

Редакционная коллегия оставляет за собой право на редактирование статей, при этом с точки зрения научного содержания авторский вариант сохраняется.

Статьи, не принятые к публикации, не возвращаются.

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается!

*Приложение 1*

### РУБРИКАЦИЯ ЖУРНАЛА «Известия Института инженерной физики»

**Постоянные рубрики**

- **Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы.**
- **Радиотехника и связь.**
- **Информатика, вычислительная техника и управление.**

**Разовые рубрики**

- **Техника специального назначения.**
- **Инновационные проекты.**
- **Техническое регулирование.**
- **Профессиональное образование.**
- **Искусственный интеллект и робототехника.**
- **Медицина и фармацевтика.**
- **Диагностические системы.**
- **Научные обзоры. Научные рецензии. Отзывы.**

В соответствии с Решением Межведомственной комиссии РФ по защите государственной тайны №69 от 26 февраля 2001 г., требованиями законов №5485-1 «О государственной тайне» от 21 июля 1993 г., №149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и защите информации» от 27 июля 2006 г. статьи для публикации принимаются только при наличии экспертного заключения с разрешением на открытое опубликование.

INTERREGIONAL PUBLIC INSTITUTION
"INSTITUTE OF ENGINEERING PHYSICS"
(SCIENTIFIC, EDUCATIONAL AND INDUSTRIAL INSTITUTION)

## CONTENTS


### INSTRUMENT MAKING, METROLOGY AND INFORMATION–MEASURING DEVICES AND SYSTEMS

**Kolombet V.A., Panchelyuga V.A., Lesnykh V.N.**
Self-reproducing automata in the universe: life, universal period-tripling system, fundamental interactions ..... 2

**Korobkov A.A., Kulik M.V., Sadekova A.A., Sergeev S.S., Smorodin A.I.**
Analysis of alternative construction schemes of air evaporators and ways to increase their efficiency ..... 5

**Poryadina D.A., Kuchmenko T.A., Buzakin I.S., Griboyedova I.A., Karlov P.A.**
Application of piezo quartz microweights for express out-of-laboratory determination actual resins in diesel fuels ..... 11

**Korshunov M.A., Sholokhov A.V.**
Using a digital road map for initial exhibition of autonomous terrestrial navigation systems ..... 15

### RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATION

**Zelenevsky V.V., Zelenevsky Y.V., Popov A.V., Egorov V.V., Nakonechny A.B.**
Mathematical model of imito-protected data transmission channel by steganographic methods ..... 20

**Chirov D.S., Ryumshin K.Y., Atakishchev O.I., Kochetkov Y.A.**
Algorithm and results of modeling the signal processing process in a multi-position radar station for detecting unmanned aerial vehicles ..... 24

**Ryumshin K.Y., Atakishchev O.I., Amelenkov A.A., Zhuravlev A.P.**
Phasing algorithm for demodulation of phase-keyed signals and signals with quadrative amplitude modulation ..... 35

**Brodsky M.S., Zvonarev V.V., Popov A.S.**
Methodology for calculating the number of repetitions in the radio channel of feedback message transmission systems operating under the influence of multiplicative interference ..... 40

**Zvonarev V.V., Popov A.S., Khudik M.Y.**
The calculation methodology for the energetic reserve of the radio link for median and mean values of signal power ..... 43

### INFORMATION SCIENCE, COMPUTING AND MANAGEMENT

**Vershinin E.V., Fedorova V.A., Tkachenko A.V.**
The efficiency of intelligent classification methods in predicting cardiovascular diseases ..... 50

**Kolebtsev V.I., Belov Y.S., Zelentsova E.V.**
Development and analysis of the results of the news recommendation service ..... 56

**Kolpakov D.M., Vershinin E.V., Zelentsova E.V.**
Calculation of clouds mask from preview images of multispectral satellite images ..... 61

**Mazin A.V., Gaifulin V.V., Chudin K.S., Khodyrev T.B., Tegentsev I.M.**
Information theory as a methodological basis for solving problems of adequate assessment of information security capabilities ..... 64

**Rassokhin G.N., Kondakov S.E.**
A method for constructing a chord of the desired angle with a trisection of a given ..... 69

**Krakhmalev D.V., Demidov L.N., Danilov V.P.**
Development of reconfigurable structure of high-load computing systems ..... 73

**Vasiliev V.V., Kreknin A.V.**
Method and program of design analysis and optimization of wing-type aircraft structures ..... 78

**Smurov S.V., Volkov G.G.**
On the resolution of SL(2,C)-singularities in affine and toric projective spaces ..... 83

### ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND ROBOTICS

**Mikhailov Y.F., Nazarenko A.V.**
Development of a model considering the influence of emotions on the formation of individual trajectory of student learning based on neural network technology ..... 92

### MODERN MEDICINE AND PHARMACEUTICS

**Ermakov A.M., Tzar'kova E.A., Antonova O.Y., Kamenskikh K.A., Kochetkova O.Y., Kolmanovich D.D.**
On the issue of radioprotective properties of Tameron ..... 97

**AUTHORS** ..... 101

**THE ETHICS OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS** ..... 103

**REQUIREMENTS TO AUTHORS** ..... 104


**Учредитель и издатель – МОУ «ИИФ».** Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а

Подписной индекс: 59190
по каталогу «Урал-Пресс»

**Адрес редакции:** 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а.
Тел: +7(4967)35-31-93, 35-13-71
Факс: +7(4967)35-44-20 http://www.iifrf.ru
E-mail: info@iifmail.ru

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия. Свидетельство о регистрации СМИ ПИ №ФС77-26650 от 20 декабря 2006 г.
Отпечатано на полиграфической базе МОУ «ИИФ».
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а.
Подписано в печать 16.03.2022.
Дата выхода в свет 21.03.2022. Тираж 2000 экз. Цена свободная.
© Межрегиональное общественное учреждение «Институт инженерной физики» (ИИФ), 2022.

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