

№ 1 +0  
2024 [71]

# ИЗВЕСТИЯ

научно-технический журнал  
ИНСТИТУТА ИНЖЕНЕРНОЙ ФИЗИКИ



8 февраля  
С Днём российской науки!



## В НОМЕРЕ

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

**2** Захаров В.Л., Смирнов Д.В., Казаков Р.Р.

Обоснование показателя качества функционирования оптико-электронных средств перспективных космических аппаратов

**6** Беркович С.Б., Котов Н.И., Махаев А.Ю., Шолохов А.В.

Контроль стабильности опорных направлений при метрологическом обеспечении средств измерения азимута

**13** Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет В.В.

Представление структуры естественного интеллекта в биофизическом психоанализе

### РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

**18** Кваشنников В.В.

Нейронные модули обработки сигналов в каналах с группирующимися ошибками

**25** Пашинцев В.П., Белоконов Д.А., Гринев Е.М., Бойченко И.А.

Область применимости приближенной формулы для допустимого отношения сигнал/помеха при расчете надежности коротковолновой связи с райсовскими замираниями

**31** Рыженко С.В.

Анализ существующих подходов к вопросу защиты обрабатываемой средствами вычислительной техники информации от утечки по техническим каналам

**35** Зеленевский В.В., Зеленевский Ю.В., Кургузов В.В., Наконечный А.Б.

Методика оценки помехоустойчивости декаметрового канала передачи данных с разнесённым приёмом радиосигналов

**40** Алаторцев А.И., Крикунов А.А.

Оценивание интенсивности абонентского трафика в телекоммуникационных системах, построенных на основе широкополосных радиосетей

### ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

**45** Царьков А.Н., Павлов А.А., Пашинцев В.П., Романенко Ю.А., Романенко А.Ю., Макеев М.И., Павлов Ф.А.

Обоснование метода резервирования специализированных ЭВМ

**53** Бутрина Е.П.

Оценка влияния рефракции ЭМ-волн в тропосфере и рельефа трассы на затухание ЭМ-волн и вероятность обнаружения защищаемого объекта

**61** Лэ В.Х., Бегаев А.Н., Комаров И.И.

Модель угроз информационной безопасности системы отслеживания качества продукции для развивающихся рынков

**71** Смуров С.В., Волков Г.Г.

Спин-партоный путь к квантованию протона

**80** Пушкарёва Е.Ю., Мельник Д.Ю.

Математические модели систем стабилизации баллистических ракет и анализ их устойчивости при управлении текущими и конечными параметрами

**86** Ерохин С.Д., Лабазников А.П., Петухов А.Н., Пилюгин П.Л., Мусатов Р.Л.

Среда поддержки автономных агентов защиты технологически обособленных критических информационных инфраструктур

### ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И РОБОТОТЕХНИКА

**94** Бугаков А.И., Бугаков И.А., Царьков А.Н., Шульга М.М.

Способ непрерывной адаптивной многофакторной аутентификации пользователя смартфона

**102** СОБЫТИЯ

**103** AUTHORS

**105** ЭТИКА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

**106** ТРЕБОВАНИЯ К АВТОРАМ СТАТЕЙ

Научно-технический журнал

**ИЗВЕСТИЯ  
Института инженерной физики  
№1 (71) 2024**

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 телекоммуникации  
2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации  
2.3.6. Методы и системы защиты информации, информационная безопасность

Относится к категории К-2 (в соответствии с Распределением журналов по категориям (письмо ВАК от 06.12.2022 № 02-1198)).

Главный редактор,  
председатель редакционного совета  
и редакционной коллегии

**Алексей Николаевич Царьков**

Президент АНО «Институт инженерной физики»  
заслуженный деятель науки РФ,  
доктор технических наук, профессор

Редакционный совет

**Геннадий Иванович Азаров**

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

**Сергей Владимирович Дворянкин**

начальник департамента Государственной  
корпорации «РОСТЕХ» ОАО КРЭТ,  
доктор технических наук, профессор

**Николай Михайлович Емелин**

главный научный сотрудник  
ФГБУ НТИМИ,  
заслуженный деятель науки и техники РФ,  
доктор технических наук, профессор

**Валерий Иванович Николаев**

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

**Владимир Георгиевич Редько**

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

**Юрий Александрович Романенко**

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

**Анатолий Васильевич Тодосийчук**

главный научный сотрудник Центра научно-информационных исследований по науке, образованию и технологиям Института научной информации по общественным наукам РАН, почетный работник науки и техники РФ, доктор экономических наук, профессор

**Игорь Анатольевич Шерemet**

заместитель директора Российского фонда фундаментальных исследований по науке, академик РАН, доктор технических наук, профес

### Редакционная коллегия

**Олег Николаевич Андрух**

почетный работник науки и техники РФ,  
кандидат технических наук, доцент

**Борис Фёдорович Безродный**

доктор технических наук, профессор

**Сергей Борисович Беркович**

почетный геодезист РФ  
доктор технических наук, профессор

**Владимир Эрнестович Бородай**

лауреат Государственной премии СССР,  
кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник

**Игорь Александрович Бугаков**

заслуженный изобретатель РФ,  
почетный работник науки и техники РФ,  
доктор технических наук, профессор

**Вадим Геннадьевич Грибунин**

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

**Сергей Григорьевич Данилюк**

доктор технических наук, профессор

**Владимир Владимирович 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



### Денис Юрьевич Паршунин

Первый Вице-президент Института  
по экономической безопасности,  
правовой и кадровой работе

#### Уважаемые коллеги!

В День российской науки важно и значимо подвести итоги и рассказать о результатах научной деятельности АНО «Институт инженерной физики».

В 2023 году сотрудниками научно-исследовательских подразделений Института выполнены десятки НИР и ОКР. В области развития систем и средств связи ведутся работы по созданию бортовой аппаратуры космической связи на базе стойких электрорадиоизделий отечественного производства. В области развития навигационно-геодезических систем обеспечена серийная поставка изделий, входящих в состав Единого комплекса астрономо-геодезического, навигационного и геоинформационного обеспечения. Выполнен ряд комплексных работ по определению истинного курса кораблей по всей территории России. В области развития квантовых технологий в сотрудничестве с НИЯУ МИФИ (Москва) и Технологическим институтом сверхтвёрдых и новых углеродных материалов (г. Троицк) достигнуты научные результаты мирового уровня – по разработанному технологическому процессу впервые в России выращены сверхчистые образцы кристаллов алмаза и имплантированы в них одиночные NV-центры. Количество инициативных НИР, проводимых учеными и специалистами фармацевтического производственного центра, выросло за год в 5 раз.

В ходе Форума «Армия-2023» руководством Минобороны и Минздрава РФ продемонстрирован опытный образец первого отечественного нанопорового секвенатора «НАНОПОРУС». Благодаря проводимым Институтом разработкам Россия станет третьей страной в мире, владеющей крайне перспективной технологией нанопорового секвенирования. Развитие этой технологии является стратегически важной задачей для обеспечения как биобезопасности, так и развития передовой медицины и биологической науки в целом.

Активно развивается Технопарк в сфере высоких технологий. В течение года заключены соглашения между Технопарком и 9 промышленными предприятиями, 9 научно-исследовательскими и высшими учебными заведениями, 5 иностранными компаниями и 1 организацией, представляющей инновационную структуру (Серпуховская торгово-промышленная палата), а также 9 – с резидентами Технопарка. Организационными – резидентами Технопарка в течение года было реализовано 20 различных инновационных проектов. На мощностях строящегося на территории Технопарка производственного комплекса планируется развернуть изготовление секвенатора «НАНОПОРУС».

Развитию научных направлений способствуют и проведенные по инициативе либо с участием Института конференции, выставки и форумы. В частности, в Технопарке состоялись научно-практические конференции «Избранные вопросы хирургии. Мультидисциплинарный подход в лечении больных», «Робототехнические средства, комплексы и системы». Институт провел юбилейную V Межведомственную научно-практическую конференцию «Телекоммуникации и кибербезопасность: специальные системы и технологии», а также выступил генеральным партнером и участником IX научно-практической школы-конференции «Аллергология, клиническая иммунология и инфектология для практикующих врачей».

От всей души поздравляю ученых, исследователей, конструкторов, педагогов нашего Института с Днем российской науки! Желаю успехов во всех начинаниях, реализации всех замыслов, новых научных побед во благо нашей великой России!

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 623.9

## ОБОСНОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ FEATURES OF CONSTRUCTING BLOCK DIAGRAMS OF SPECTRAL- ZONAL OPTICAL-ELECTRONIC MEANS

**Владимир Леонидович Захаров**

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

**Дмитрий Вячеславович Смирнов**

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

**Рафаэль Рамисович Казаков**

*кандидат технических наук  
заместитель начальника кафедры  
«Тактики частей и подразделений  
ракетно-космической обороны»  
ВКА им. А.Ф. Можайского*  
Адрес: 197198, Санкт-Петербург,  
ул. Ждановская, д. 13  
Тел.: +7 (911) 223-59-67  
E-mail: xoxlov1984@bk.ru

### Аннотация

Рассмотрены этапы инспекции космических объектов, выделены частные задачи селекции этих объектов, определены показатели качества функционирования ОЭС.

**Ключевые слова:** оптико-электронные средства, анализируемый космический объект, космический аппарат-инспектор, селекция космических объектов, ложные цели.

### Summary

The stages of inspection of space objects are considered, specific tasks for the selection of these objects are highlighted, and quality indicators for the functioning of the EPS are determined.

**Keywords:** optical-electronic means, analyzed space object, inspector spacecraft, selection of space objects, decoys.

### Введение

Известные методы синтеза спектрально-зонных ОЭС, базирующиеся на априорном знании спектральных характеристик излучения цели и фона, неприемлемы при создании ОЭС систем самонаведения космического аппарата-инспектора (КАИ), что обусловлено несколькими причинами. Во-первых, при разработке ОЭС КАИ заранее невозможно указать, по какому анализируемому космическому объекту (АКО), спектр излучения которого строго индивидуален, будет осуществляться применение КАИ [1]. Во-вторых, в силу неопределенности времени начала, времени применения КАИ по АКО, априори невозможно определить условия наблюдения и освеще-

нения АКО в момент инспекции, оказывающие существенное влияние на спектральный состав его излучения. В-третьих, неопределенность параметров применяемой противником ложной цели (ЛЦ) и ее излучательных характеристик, по существу, делает задачу выбора спектральных диапазонов в принципе неразрешимой с помощью известных методов, поскольку отсутствие информации о фоновых объектах в этом случае противоречит самой постановке задачи селекции.

Все вышесказанное подтверждает актуальность исследований по обоснованию показателя качества функционирования оптико-электронных средств перспективных космических аппаратов, чему посвящена настоящая статья.

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

## Этапы наведения космического аппарата-инспектора

### на анализируемый космический объект

Наведение КАИ на АКО является сложным динамическим процессом, условно разделяемым на пять последовательных этапов независимо от способа инспекции АКО [2], а именно:

- формирование и закладка на борт КАИ полетного задания;
- выведение КАИ в зону поиска цели;
- обнаружение АКО и его селекция на фоне естественных и искусственно организованных помех;
- самонаведение КАИ;
- инспекция АКО.

На первом этапе применительно к имеющемуся приборному составу КАИ и его алгоритмическому обеспечению рассчитывается комплекс исходных величин, определяющих траекторию движения КАИ относительно АКО на этапе выведения, а также задающих эталонное описание АКО на языке селективных признаков.

На втором-третьем этапе с помощью двигательной установки (или ракеты-носителя и разгонного блока) КАИ с опорной орбиты) выводится в ближнюю зону цели (дальность до АКО при этом составляет 100-300 км) и осуществляет обнаружение и селекцию цели в поле зрения ОЭС.

По окончании селекции осуществляется самонаведение (четвертый этап) КАИ на отсеleccionированную цель с ее последующей инспекцией (пятый этап).

По окончании этапа выведения КАИ в зону поиска цели в момент начала активного функционирования ОЭС, в поле зрения последнего помимо АКО будут находиться фоновые объекты, к которым относятся, во-первых, объекты естественного и искусственного происхождения, а во-вторых, объекты, целевым назначением которых является срыв процесса инспекции АКО [2] или снижение его эффективности (искусственно организованные помехи). Количественные оценки фоновых объектов показывают, что при использовании поля зрения ОЭС размером на уровне  $5 \times 5$ , АКО будет наблюдаться на фоне в среднем 90-100 звезд ярче  $9^m$  (в зависимости от орбиты АКО) других КА и фрагментов. Число искусственно организованных помех оценивается в 3-5.

В силу скоротечности процесса инспекции АКО (этап самонаведения длится несколько десятков секунд) на процедуру принятия решения по выбору цели из группы наблюдаемых объектов отводится промежуток времени в несколько секунд.

Все вышесказанное позволяет заключить, что при наличии большого числа фоновых объектов и в условиях жесткого временного дефицита важнейшим этапом процесса наведения КАИ является решение задачи селекции АКО на фоне существующих помех [1,3], качество которого во многом определяет целевую эффективность КАИ.

В соответствии с принятой в настоящее время в ряде организаций классификацией выделяют три следующие частные задачи селекции АКО:

- выделение цели на фоне галактических и внегалактических объектов естественного происхождения (звезды, галактики, туманности и т.п.), носящее условное наименование «Селекция-0»;
- выделение цели на фоне техногенных тел (другие КА, фрагменты отработавших КА и ракетных блоков) – «Селекция-1»;
- выделение цели на фоне искусственно организованных помех (ложные цели, цели-ловушки) – соответственно, «Селекция-2».

Такое разделение обусловлено необходимостью поэтапного принятия решения на множестве наблюдаемых объектов, заключающегося в последовательной отбраковке объектов, принадлежащих нулевой, первой и второй группе. Данный подход подразумевает использование специализированных алгоритмов, решающих соответствующие задачи «Селекции-0, 1 и 2» и строящихся на основе привлечения определенных селективных признаков АКО.

## Определение показателей качества функционирования оптико-электронных средств

Показателем качества целенаправленного процесса (функционирования системы) принято считать вероятность достижения в результате выполнения процесса (системой) поставленной цели  $P_{дц}$ . Основной целью функционирования ОЭС как базового элемента системы управления КАИ является обеспечение последней координатной информацией о положении АКО в поле зрения ОЭС [2,3], на основании которой осуществляется процесс самонаведения КАИ и инспекция АКО с вероятностью  $P_{п}$ . Следовательно, вероятность достижения цели КАИ  $P_{дц}^п$  определяется произведением

$$P_{дц}^п = P_{дц}^{ОЭС} \cdot P_{п} \quad (1)$$

где  $P_{дц}^{ОЭС}$  – вероятность достижения цели ОЭС;  
 $P_{п}$  – вероятность успешной инспекции АКО.

В силу поэтапности выполнения процесса инспекции, функционирование ОЭС может быть

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

представлено последовательностью различных режимов, к которым относятся следующие:

- пассивный режим (на этапе выведения КАИ);
- режим поиска и обнаружения цели;
- режим селекции АКО на фоне естественных и искусственно организованных помех.

Исходя из этого, вероятность достижения цели ОЭС определяется следующим образом

$$P_{\text{ДЦ}}^{\text{ОЭС}} = P(\hat{\Gamma}) \cdot P\left(\frac{\hat{H}}{\Gamma}\right) \cdot P(\hat{O}) \cdot P\left(\frac{\hat{S}}{O}\right) \quad (2)$$

где  $P(\hat{\Gamma})$  – вероятность того, что в момент начала операции ОЭС готово к функционированию;

$P\left(\frac{\hat{H}}{\Gamma}\right)$  – условная вероятность того, что в ходе операции надежностные характеристики ОЭС будут находиться в пределах, обеспечивающих достижение цели;

$P(\hat{O})$  – вероятность обнаружения АКО и ЛЦ в поле зрения ОЭС;

$P\left(\frac{\hat{S}}{O}\right)$  – вероятность селекции АКО на фоне помех.

Как было показано выше, решение задачи селекции АКО осуществляется, в свою очередь, последовательной отбраковкой различных классов фоновых объектов, а именно звезд, техногенных тел и ЛЦ на основе использования координатной и некоординатной информации [2]. Тогда вероятность селекции АКО будет определяться

$$P\left(\frac{\hat{S}}{O}\right) = P(\hat{S}_n) + (1 - P(\hat{S}_n)) \cdot P(\hat{S}_k) \quad (3)$$

где  $P(\hat{S}_n)$  – вероятность селекции АКО по некоординатной информации;

$P(\hat{S}_k)$  – вероятность селекции АКО по координатной информации.

Проведенная неформальная декомпозиция процесса функционирования ОЭС позволяет при прочих равных условиях выделить вероятность решения задачи «Селекция-2» ( $P(\hat{S}_n)$ ) в качестве частного показателя качества функционирования ОЭС. Действительно, как было показано выше, селекция АКО на фоне сложных ЛЦ может быть осуществлена только по некоординатной информации, в силу чего ( $P(\hat{S}_k) \rightarrow 0$ ), а вероятность достижения цели ОЭС  $P_{\text{ДЦ}}^{\text{ОЭС}}$  в отдельной операционной ситуации  $\hat{\omega}_{\text{ОЭС}}$  (далее она будет обозначаться ( $P_{\text{ДЦ}}^{\text{ОЭС}}$ ) будет пропорциональна вероятности  $P(\hat{S}_n)$

$$P_{\text{ДЦ}}^{\text{ОЭС}} = \tilde{P}_0 \cdot P_n^{\text{ОЭС}} \quad (4)$$

где  $\tilde{P}_0 = P(\hat{\Gamma}) \cdot P\left(\frac{\hat{H}}{\Gamma}\right) \cdot P(\hat{O})$

$P_n^{\text{ОЭС}}$  – вероятность решения задачи «Селекция-2» в операционной ситуации  $\hat{\omega}_{\text{ОЭС}}$ .

В силу того, что при построении ОЭС невозможно указать, в какой именно операционной

ситуации  $\hat{\omega}_{\text{ОЭС}}$  ожидается применение ОЭС по назначению, необходимо введение некоторого обобщенного показателя, характеризующего качество функционирования ОЭС в изменчивых условиях применения. Таким показателем может выступать гарантированная вероятность достижения цели  $P_{\text{ДЦ}}^{\Gamma}$ , определяемая выражением

$$P_{\text{ДЦ}}^{\Gamma} = \min_{\Omega} \{P_{\text{ДЦ}}^{\text{ОЭС}}\} \quad (5)$$

Данный показатель дает пессимистическую оценку качества функционирования ОЭС, позволяющую указать границу, ниже которой при случайном выборе операционной ситуации  $\hat{\omega}_{\text{ОЭС}}$  вероятность достижения цели ОЭС  $P_{\text{ДЦ}}^{\text{ОЭС}}$  не опустится.

Гарантированная вероятность  $P_{\text{ДЦ}}^{\Gamma}$ , приемлемая при решении оптимизационной задачи поиска параметров ОЭС  $U_{(2)}^{\text{ОПТ}}$ , тем не менее, не позволяет количественно оценить эффект операции, проводимой в изменчивых условиях функционирования ОЭС. В самом деле, данный показатель, по существу, определяется состоянием объектов окружающей среды в одной единственной операции, которая, очевидно, будет реализована с вероятностью  $p_{\text{ОС}}$  (здесь  $p_{\text{ОС}}$  – вероятность выбора операционной ситуации из исходного множества  $\Omega$  при случайном задании времени селекции  $t_0$ ).

Помимо этого, данный показатель не учитывает, насколько вероятно появление таких условий боевого применения КАИ, которым соответствует полученная оценка.

Более полно характеризует качество функционирования ОЭС средневзвешенная вероятность достижения цели  $P_{\text{ДЦ}}^{\text{СР}}$

$$P_{\text{ДЦ}}^{\text{СР}} = \sum_{\substack{\omega=1 \\ c=1}}^{\Omega} P_{\text{ДЦ}}^{\text{ОЭС}} \cdot P_{\text{ОС}} \quad (6)$$

Положим для определенности (4)  $\tilde{P}_0 \rightarrow 1$ . Тогда выражения для гарантированной средневзвешенной вероятности достижения цели можно представить в виде

$$P_{\text{ДЦ}}^{\text{СР}} = \min_{\Omega} \cdot P_n^{\text{ОЭС}},$$

$$P_{\text{ДЦ}}^{\text{СР}} = \sum_{\substack{\omega=1 \\ c=1}}^{\Omega} P_n^{\text{ОЭС}} \cdot P_{\text{ОС}}.$$

Таким образом, в качестве показателей качества функционирования ОЭС могут быть выбраны гарантированная и средневзвешенная вероятность достижения цели.

### Заключение

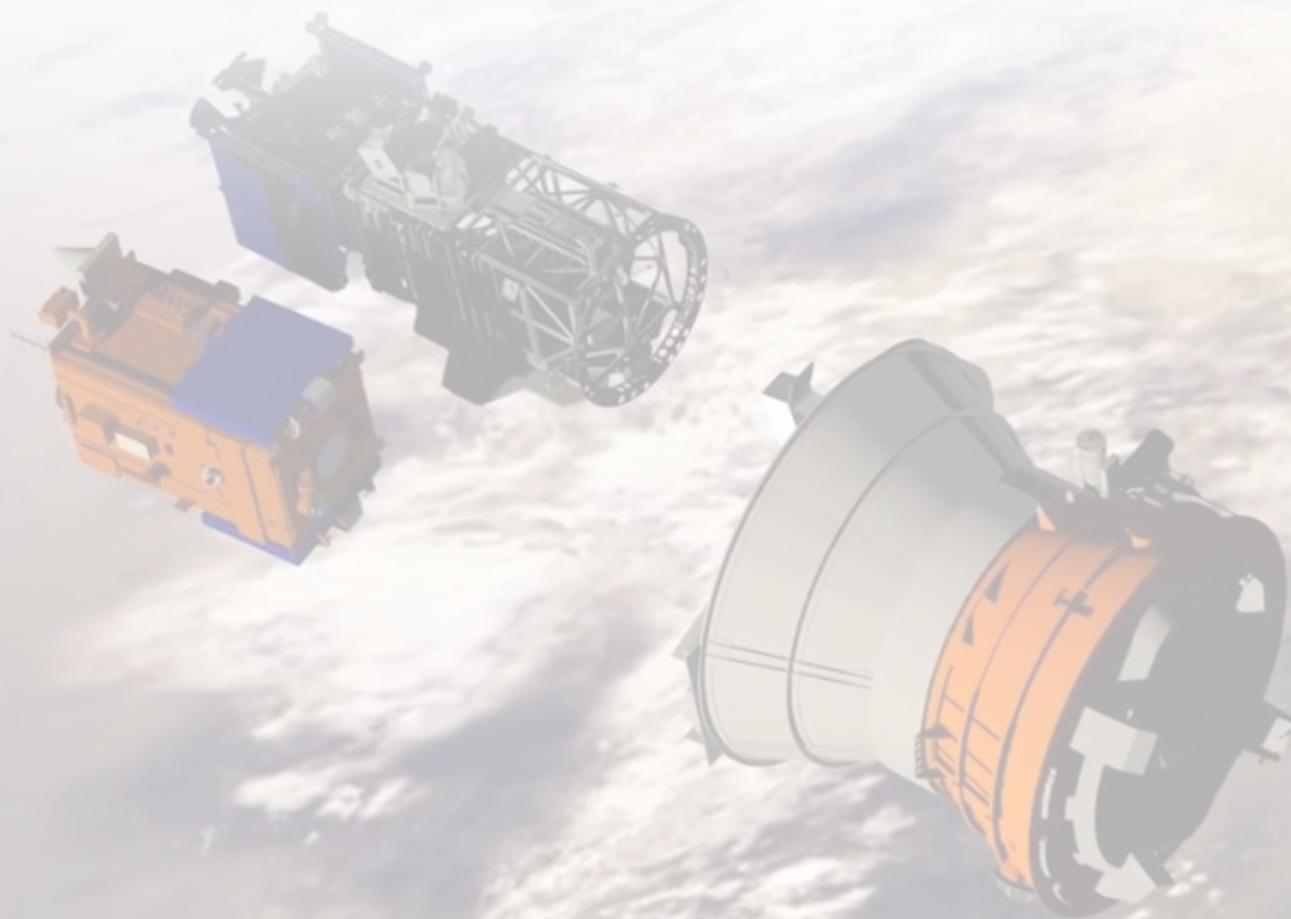
На основании анализа этапов работы ОЭС, введены показатели качества его функционирования, которые позволяют максимизировать вероятность селекции АКО при случайном вы-

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

боре операционной ситуации. В качестве таких показателей выбраны гарантированная и средневзвешенная вероятность достижения цели, в равной мере приемлемые для решения задачи синтеза ОЭС. В дальнейших исследованиях предлагается использовать оба рассмотренных показателя ввиду отсутствия существенных отличий при их вычислении.

### Литература

1. Лучко С.В. Информационные оптико-электронные средства космических аппаратов: уч. пособ. / С.В. Лучко, И.А. Трофимов, А.А. Ядренкин. СПб, 2015. 51 с.
2. Казаков Р.Р. Прикладная оптика [Электронный ресурс]: уч. пособ. / Р.Р. Казаков, Д.Л. Кольгин, И.А. Трофимов. Электрон. текстовые дан. (34.3 Мб). СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2021. 1 электрон, опт. диск (CD-ROM).
3. Молчанов А.С. Оценка оптико-электронных систем воздушной разведки на основе критерия информационной емкости / А.С. Молчанов, И.В. Шортский, Ю.Г. Веселов // Материалы XI Всероссийской научно-технической конференции «Научные чтения по авиации, посвященные памяти проф. Н.Е. Жуковского»: Сборник докладов. М.: Издательский дом Академия имени проф. Н.Е. Жуковского, 2015. С.510-513.



# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 528.5-187.4 + 528.526.6 + 528.13 + 681.7 + 681.2.089

## КОНТРОЛЬ СТАБИЛЬНОСТИ ОПОРНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ПРИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ АЗИМУТА CONTROL OF THE STABILITY OF REFERENCE DIRECTIONS DURING METROLOGICAL SUPPORT OF AZIMUTH MEASURING INSTRUMENTS

**Сергей Борисович Беркович**  
доктор технических наук, профессор  
начальник центра  
навигационно-геодезических систем  
АНО «Институт инженерной физики»  
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,  
Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: 8 (4967) 35-31-93  
E-mail: naviserp5@iifmail.ru

**Николай Иванович Котов**  
кандидат технических наук, профессор  
заместитель начальника управления разработки  
навигационно-геодезических систем  
АНО «Институт инженерной физики»

**Александр Юрьевич Махаев**  
начальник отдела –  
заместитель начальника центра  
навигационно-геодезических систем  
АНО «Институт инженерной физики»

**Алексей Викторович Шолохов**  
доктор технических наук, профессор  
начальник управления разработки  
навигационно-геодезических систем  
АНО «Институт инженерной физики»

### Аннотация

Для разработанного комплекса средств метрологического обеспечения средств измерения азимута решена задача контроль стабильности опорных направлений. Описан состав приборов для эффективного решения задачи и разработана рациональная схема их расположения с учетом оптических связей и особенностей различных тестируемых приборов. Обоснованы допустимые расхождения значений азимутов опорных направлений, определяемых различными способами. Приведены подходы к нахождению источников нестабильности азимутов по результатам измерений азимутов. Описано функциональное назначение и основные возможности специализированного программного обеспечения, реализующего все операции по контролю стабильности опорных направлений в комплексе средств метрологического обеспечения средств измерения азимута.

**Ключевые слова:** средства измерения азимута; метрологическое обеспечение; опорные направления, контроль стабильности, допустимые расхождения азимутов.

### Summary

For the previously elaborated system of metrological support of azimuth measuring tools, the problem of stability control for reference directions has been solved. A set of devices for the effective solution of the problem is characterized and a rational scheme of their layout is developed, taking into account optical accessibility and the characteristics of various tested instruments. The tolerances for the differences in the azimuth values of the reference directions determined by different methods are justified. Approaches to finding the causes of azimuth instability based on azimuth measurements are presented. The functionality and main capabilities of specialized software that implements all operations to control the stability of reference directions in a system of metrological support for azimuth measuring instruments are described.

**Keywords:** azimuth measuring instruments; metrological support; reference directions, stability control, permissible azimuth differences.

### Введение

Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии в 2022 году утверждён государственный первичный специальный эталон координат местоположения, в состав которого входит комплекс средств метрологического обеспечения средств измерения азимута (КСМО СИА), созданный сотрудниками центра навигационно-геодезических систем [16,17]. Схема расположения элементов КСМО СИА [1]

приведена на *рисунке 1*. Хранителем опорных направлений - нормалей к четырем зеркальным граням является призма оптического хранителя азимутальных направлений (ОХАН), углы между гранями которой паспортизованы с высокой точностью. Значения астрономических азимутов нормалей к боковым граням ОХАН (со стороны пилонов Пл 1 –  $A_{x2}$  и Пл 2 –  $A_{x4}$ ) и наружной грани со стороны астропункта (АП) используются для метрологических проверок автоколлимаци-

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

онных средств измерений. Основным средством измерения азимута является оптико-электронный астровизир (ОЭА) автоматической системы астрономических азимутальных определений (АСААО), который определяет значение азимута внутренней грани ОХАН.

Качество метрологического комплекса определяется стабильностью значения азимута опорного направления, которая может быть нарушена по различным причинам, основными из которых являются:

- нестабильность измерений азимута направления;
- нестабильность фундамента Ф2, на котором установлен ОХАН;
- нестабильность фундамента Ф1, на котором установлен астровизир.

Поэтому необходим комплексный подход к способам определения азимутов опорных направлений, включающий оптимальную обработку избыточных измерений [3,5] и введение в состав КСМО СИА азимутального миниполигона, направления которого закреплены тремя геодезическими пунктами – фундаментами: Ф3, Ф4, Ф5. Введение азимутального миниполигона обеспечило использование двух отличных от использования АСААО вариантов определения астрономических азимутов опорных направлений:

- с использованием астрономического теодолита, установленного на АП - Ф3;
- с использованием геодезического метода азимутального ориентирования, основанного на измерении приращений координат между соответствующими пунктами.

При этом фундамент геодезического пункта ГП 1 расположен таким образом, что установленный на этом пункте автоколлимационный

геодезический прибор, имеет оптическую связь с наружной гранью ОХАН через оптический иллюминатор (ОИ). При этом направления ГП 1-ГП 2 и ГП 1-ГП 3 связаны с опорными направлениями, закрепленными призмой ОХАН. Это также позволяет использовать азимут  $A_{12}$  направления ГП 1-ГП 2 и ГП 1-ГП 3 для метрологических проверок неавтоколлимационных приборов (астрономических теодолитов, гиротеодолитов и др.)

Целью настоящей статьи является обоснование мероприятий контроля стабильности опорных направлений, используемых для передачи астрономического азимута средствам измерения азимута. Их обоснование базируется на способах и методиках обработки избыточной азимутальной информации.

### Постановка задачи

Исходные данные – азимуты  $A_{x2}$  и  $A_{x4}$  опорных направлений, хранителем которых являются боковые грани призмы ОХАН, определяются в результате выполнения следующих операций:

- определение азимута внутренней грани призмы ОХАН с использованием астровизира АСААО [2, 6] с пересчетом измеренного азимута в азимуты боковых граней;
- определение азимута внешней грани призмы ОХАН по результатам наблюдения Полярной звезды с использованием астрономического теодолита [7, 11, 15], установленного на АП с пересчетом в азимуты боковых граней;
- определение геодезических азимутов линейных базисов азимутального миниполигона с использованием геодезического метода азимутального ориентирования [4,5,8,10,13] с пересчетом в астрономические азимуты;

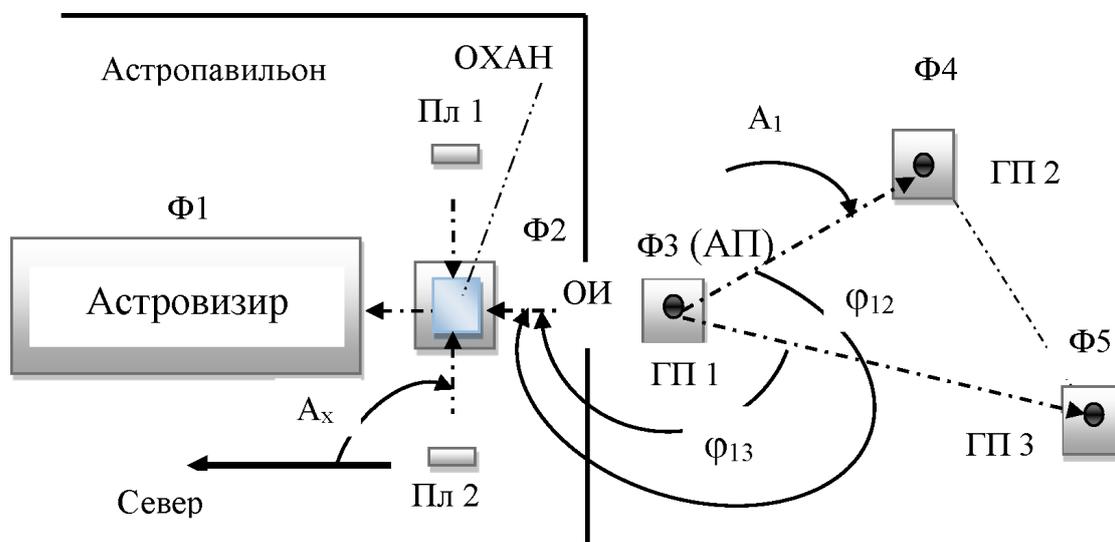


Рис. 1. Схема расположения элементов КСМО СИА

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

● измерение углов  $\Phi_{12пр}$  и  $\Phi_{13пр}$  между направлениями линейных базисов азимутального миниполигона и передача астрономических азимутов на внешнюю грань призмы ОХАН с последующим пересчетом в азимуты боковых граней.

Необходимо:

- определить показатели стабильности опорных направлений;
- обосновать допустимые значения расхождений азимутов опорных направлений, определенных различными способами;
- раскрыть принцип построения специального программного обеспечения по оценке стабильности опорных направлений.

### Оценка стабильности опорных направлений

Оценка стабильности может проводиться после каждого текущего измерения за заданное число  $k$  предыдущих измерений, а также отдельно за квартал, за год и за все время эксплуатации изделия. В оценке стабильности опорных направлений можно выделить несколько этапов:

- оценка стабильности призмы ОХАН по положению внутренней грани;
- оценка стабильности призмы по положению внутренней и наружной граней призмы ОХАН;
- оценка стабильности внешних опорных направлений азимутального миниполигона.

Оценка стабильности положения оптического хранителя азимутальных направлений по положению внутренней грани призмы проводится на основании изменения значений астрономического азимута, определяемого АСААО, внутренней грани призмы. При этом входными данными являются значения астрономических азимутов визирной оси астровизира, его контрольного элемента, внутренней грани призмы ОХАН и угол между визирной осью и нормалью к грани призмы ОХАН, хранящейся в базе данных результатов предыдущих измерений. К показателям стабильности относятся:

- разности между максимальными и минимальными значениями перечисленных параметров, измеренных за заданный период;
- значения среднеквадратических отклонений от среднего перечисленных выше параметров.

Алгоритмы определения показателей стабильности оптического хранителя азимутальных направлений в  $i$ -м измерении по положению внутренней грани призмы за заданный предыдущий интервал, включающий  $k$  измерений, представлены следующими выражениями:

$$\Delta_1^{\text{разн } i/k} = A_{\text{гр вн астр}}^{\text{max}} - A_{\text{гр вн астр}}^{\text{min}} \leq \Delta_{1 \text{ доп}};$$

$$\Delta_2^{\text{разн } i/k} = A_{\text{во}}^{\text{max}} - A_{\text{во}}^{\text{min}} \leq \Delta_{2 \text{ доп}};$$

$$\Delta_3^{\text{разн } i/k} = \alpha_{\text{во}}^{\text{max}} - \alpha_{\text{во}}^{\text{min}} \leq \Delta_{3 \text{ доп}};$$

$$A_{\text{гр вн астр}}^{\text{ср}/k} = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} A_{\text{гр вн астр } i}; \quad (1)$$

$$\sigma_{jk} = \sqrt{\frac{\sum (A_{\text{гр вн астр}}^{\text{ср}/k} - A_{\text{гр вн астр } j})^2}{N_k - 1}} \leq \Delta_{4 \text{ доп}};$$

$$\sigma_{\text{ср } k} = \frac{\sigma_{jk}}{\sqrt{N_k}} \leq \Delta_{5 \text{ доп}};$$

где  $A_{\text{гр вн астр}}$  – астрономический азимут внутренней грани призмы ОХАН;

$A_{\text{во}}$  – астрономический азимут визирной оси астровизира;

$\alpha_{\text{во}}$  – измеренный астровизиром угол между визирной осью и нормалью к внутренней грани призмы ОХАН;

$\Delta^{\text{разн } i/k}$  – разность в максимальном и минимальном значениях азимута в  $i$ -м измерении за заданный предыдущий интервал  $k$  измерений;

$\sigma_{jk}$  – среднеквадратическое отклонение (СКО) значений азимута относительно среднего значения за заданный предыдущий интервал  $k$  измерений;

$\sigma_{\text{ср } k}$  – среднеквадратическая погрешность определения астрономического азимута за заданный предыдущий интервал  $k$  измерений.

При соответствии допустимым значениям каждого оцениваемого параметра делается вывод о стабильности опорных направлений, хранителем которых является призма ОХАН. При несоответствии допустимым значениям двух и более из оцениваемых параметров проверяются две гипотезы:

- нарушение стабильности измерений АСААО;
- нарушение стабильности фундамента Ф2 (непосредственно положения призмы).

Принятие гипотезы проводится по результатам анализа выполнения допуска  $\Delta_{1 \text{ доп}}$ . Справедливость условия  $\Delta_1^{\text{разн } i/k} \leq \Delta_{1 \text{ доп}}$  позволяет сделать вывод о стабильности опорных направлений призмы ОХАН, даже при нарушении допусков  $\Delta_{2 \text{ доп}}$  и  $\Delta_{3 \text{ доп}}$ . Последнее указывает на нарушение стабильности фундамента Ф1, что однако не сказывается на стабильности опорных направлений призмы. Превышение всех пяти заданных выражением (1) допусков указывает на нарушение стабильности измерений. При единичных сбоях условия выполнения допусков  $\Delta_{4 \text{ доп}}$  и  $\Delta_{5 \text{ доп}}$  могут сохраняться.

Нарушение стабильности фундамента Ф2 (непосредственно положения призмы) определяется превышением допусков  $\Delta_{1 \text{ доп}}$  и  $\Delta_{3 \text{ доп}}$ , но при

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

обязательной стабильности азимута визирной оси астровизира, характеризуемой выполнением допуска  $\Delta_{\text{доп}}$ . Целесообразно подкреплять вывод о гипотезе нарушения стабильности фундамента Ф2 результатами анализа стабильности призмы по положению наружной грани. Для этого проверяется допуск на разность определения азимута наружной грани между значениями, полученными пересчетом азимута от внутренней грани и измерением азимута астрономическим теодолитом, установленным астропункте, в соответствии со следующим выражением:

$$\Delta_{\epsilon}^{\text{разн } i/k} = \left| A_{\text{гр нар астр}}^{\text{ср}/k} - A_{\text{гр нар астр}}^i \right| \leq \Delta_{\epsilon \text{ доп}}, \quad (2)$$

где  $A_{\text{гр нар астр}}^{\text{ср}/k}$  – среднее значение астрономического азимута наружной грани, пересчитанное от внутренней грани;

$A_{\text{гр нар астр}}^i$  – значение астрономического азимута наружной грани, измеренное астрономическим теодолитом.

Нарушение условия (2) подтверждает нестабильность опорных направлений призмы ОХАН.

Другой вариант дополнительного определения азимута наружной грани – угловая передача азимута от направлений линейных базисов азимутального миниполигона. При этом алгоритмы контроля стабильности и внутренних и внешних опорных направлений основаны на следующих выражениях:

$$\begin{aligned} A_{\text{гр нар астр}1}^{i/\Gamma} &= A_{12} + \varphi_{12}; \\ A_{\text{гр нар астр}2}^{i/\Gamma} &= A_{13} + \varphi_{13}; \\ A_{\text{ср нар}}^{i/\Gamma} &= (A_{\text{гр нар астр}1}^{i/\Gamma} + A_{\text{гр нар астр}2}^{i/\Gamma})/2; \\ \Delta_7^{\text{разн } i/k} &= \left| A_{\text{гр нар астр}}^{\text{ср}/k} - A_{\text{ср нар}}^{i/\Gamma} \right| \leq \Delta_7 \text{ доп}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\Delta_8^{\text{разн } i/k} = A_{12}^{\text{max}(13)} - A_{12}^{\text{min}(13)} \leq \Delta_8 \text{ доп};$$

$$\Delta_9^{\text{разн } i/k} = \varphi_{12}^{\text{max}(13)} - \varphi_{12}^{\text{min}(13)} \leq \Delta_9 \text{ доп};$$

где  $A_{\text{гр нар астр}1(2)}^{i/\Gamma}$  – астрономический азимут наружной грани призмы ОХАН, полученный пе-

редачей от направления Ф3-Ф4 (Ф3-Ф5) азимутального миниполигона;

$A_{12(13)}$  – азимуты линейных базисов Ф3-Ф4 (Ф3-Ф5) азимутального миниполигона, определенные геодезическим методом с последующим пересчетом в астрономические азимуты [1,8,11-13];

$\varphi_{12(13)}$  – угол между направлениями линейных базисов Ф3-Ф4 (Ф3-Ф5) азимутального миниполигона [1,8,13] и нормалью к наружной грани призмы ОХАН.

В отличие от контроля стабильности, реализуемого с использованием астрономического теодолита, алгоритм геодезического метода обеспечивает не только контроль стабильности опорных направлений призмы ОХАН (показатель  $\Delta_7$ ), но и внешних опорных направлений, заданных линейными базисами азимутального миниполигона (показатели  $\Delta_8$  и  $\Delta_9$ ).

### Обоснование допустимых значений расхождений азимутов опорных направлений, определенных различными способами

Допустимые значения расхождений азимутов опорных направлений, определенных различными способами, находятся исходя из следующих характеристик:

- значений погрешностей (СКО) отдельных определяемых параметров КСМО СИА;
- коэффициентов оптимального осреднения параметров при наличии избыточной информации;
- доверительных вероятностей оценки характеристик интервалов расхождений параметров.

Значения СКО отдельных определяемых параметров КСМО СИА приведены в *таблице 1* [1]. Коэффициенты оптимального осреднения параметров при наличии избыточной информации определяются в соответствии с критерием

**Таблица 1**  
Погрешности отдельных определяемых параметров КСМО СИА

Составляющие погрешностей	СКО, угл.с
Погрешность определения азимута внутренней грани призмы ОХАН астровизиром $\sigma_{AC}$	0,7
Погрешность определения азимута визирной оси астровизира $\sigma_{BO}$	0,5
Погрешность измерения угла между визирной осью и нормалью к внутренней грани призмы ОХАН $\sigma_{\alpha}$	0,5
Погрешность определения азимута наружной грани призмы ОХАН астрономическим теодолитом $\sigma_{AT}$	1,0
Погрешность определения азимута линейных базисов азимутального миниполигона геодезическим методом $\sigma_{\Gamma}$	1,05
Погрешность угловой передачи направлений линейных базисов на наружную грань призмы ОХАН электронным тахеометром $\sigma_{\Phi}$	0,5
Погрешность определения азимута наружной грани призмы ОХАН с учетом передачи направлений от линейных базисов $\sigma_{ГН}$	1,16
Погрешность аттестации углов между гранями призмы ОХАН	0,3

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

минимума дисперсии погрешности результата вычислений оптимального значения азимута заданного направления.

Например, при наличии двух измерений азимута  $A_{AT}$  и  $A_G$  наружной грани ОХАН с соответствующими погрешностями  $\sigma_{AT}$  и  $\sigma_G$  коэффициенты оптимального осреднения определяются в соответствии со следующими выражениями [5]:

$$A_{нар} = K_{AT}A_{AT} + K_G A_G; \quad K_{AT} + K_G = 1; \quad \frac{K_{AT}}{K_G} = \frac{\sigma_G^2}{\sigma_{AT}^2}, \text{ откуда } K_G = \frac{\sigma_{AT}^2}{\sigma_G^2 + \sigma_{AT}^2}, \quad (4)$$

где  $K_{AT}$  и  $K_G$  – оптимальные коэффициенты осреднения результатов измерений азимута наружной грани призмы ОХАН астрономическим и геодезическим способами, соответственно.

СКО значения оптимального осреднения азимута наружной грани призмы ОХАН на основании (4) определяется выражениями:

$$\sigma_{нар} = \sqrt{K_{AT}^2 \sigma_{AT}^2 + K_G^2 \sigma_G^2};$$

или

$$\sigma_{нар} = \sqrt{\left(1 - \frac{\sigma_{AT}^2}{\sigma_G^2 + \sigma_{AT}^2}\right)^2 \sigma_{AT}^2 + \left(\frac{\sigma_{AT}^2}{\sigma_G^2 + \sigma_{AT}^2}\right)^2 \sigma_G^2}. \quad (5)$$

Аналогично выражению (5) определяются оп-

тимальные значения азимута внутренней грани после передачи (с учетом углов между гранями призмы) и погрешность осреднения  $\sigma_{вн}$ . Коэффициенты осреднения  $K_{AC}$  и  $K_{нар}$  определяются аналогично по формулам (4).

Итоговые погрешности (СКО) параметров КСМО СИА с учетом результатов оптимального осреднения приведены в *таблице 2*, а допустимые значения параметров нестабильности отдельных опорных направлений, приведенных в выражениях (1-3), представлены в *таблице 3*.

Доверительные вероятности для оценки характеристик интервалов индивидуальных максимальных расхождений параметров принимаются равными 0,95, что соответствует интервалам между минимальными и максимальными значениями  $\pm 2$ СКО [3].

### Специальное программное обеспечение по оценке стабильности опорных направлений

Специальное программное обеспечение по оценке стабильности опорных направлений реализовано в виде специализированного программного обеспечения (СПО) в составе модуля

**Таблица 2**

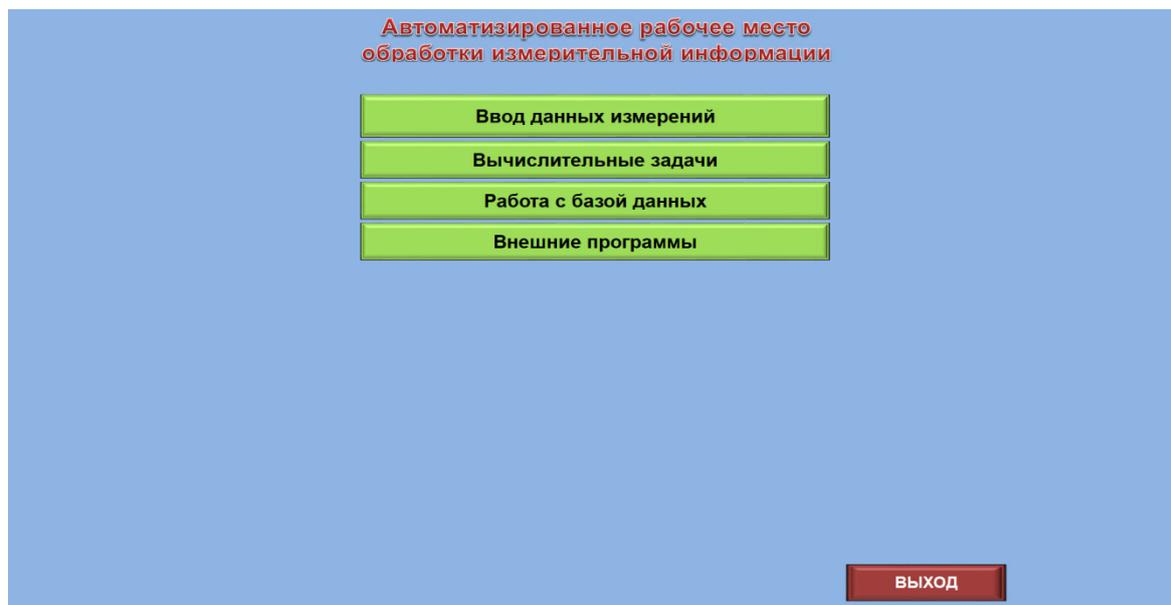
Итоговые погрешности (СКО) параметров КСМО СИА с учетом результатов оптимального осреднения

$\sigma_i$	$\sigma_{AT}$	$\sigma_{ГН}$	$K_G$	$K_{AT}$	$\sigma_{нар}$	$\sigma_{AC}$	$K_{AC}$	$K_{нар}$	$\sigma_{вн}$
—, —"	1,0	1,16	0,45	0,55	0,78	0,7	0,57	0,43	0,5

**Таблица 3**

Допустимые значения параметров нестабильности отдельных опорных направлений

$\Delta_{i доп}$	$\Delta_{1 доп}$	$\Delta_{2 доп}$	$\Delta_{3 доп}$	$\Delta_{4 доп}$	$\Delta_{5 доп}$	$\Delta_{6 доп}$	$\Delta_{7 доп}$	$\Delta_{8 доп}$	$\Delta_{9 доп}$
—, —"	2,8/2,0	2,5	2,0	0,7	0,5	2,0	2,8	4,5	2,0



**Рис. 2.** Вид окна основного модуля СПО

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

«Вычислительные задачи» автоматизированного рабочего места обработки измерительной информации (АРМ ОИИ). Вид окна основного модуля СПО приведен на *рисунке 2*.

Измерительная информация с АСААО представляется автоматически по результатам проведения режимов. С измерительных средств (спутниковая геодезическая аппаратура космических навигационных систем, электронные теодолиты и тахеометры) результаты измерений вводятся

с помощью машинных носителей информации. Вид окна модуля «Вычислительные задачи» приведен на *рисунке 3*. Вид окна «Оценка стабильности положения ОХАН» приведен на *рисунке 4*. Оценка стабильности положения внутренней грани проводится после каждого определения азимута опико-электронным астровизиром посредством оценивания допусков  $\Delta_{1\text{доп}}$ ,  $\Delta_{2\text{доп}}$  и  $\Delta_{3\text{доп}}$  в соответствии с выражениями (1). Оценка стабильности положения призмы ОХАН за вы-

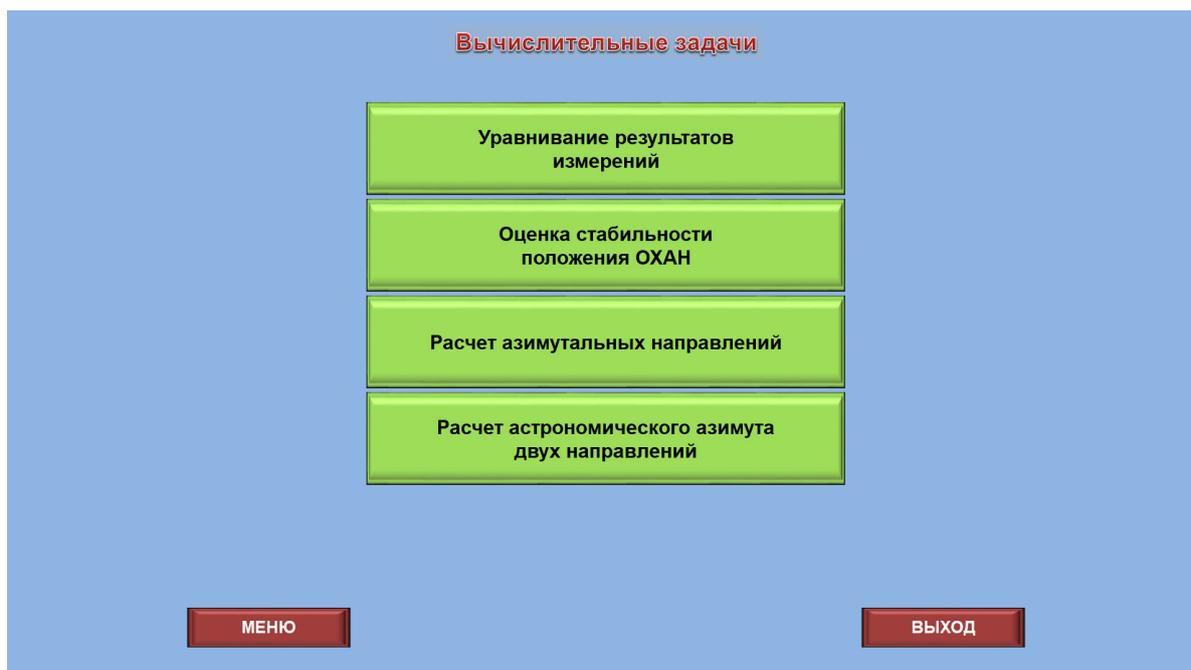


Рис. 3. Вид окна модуля «Вычислительные задачи»

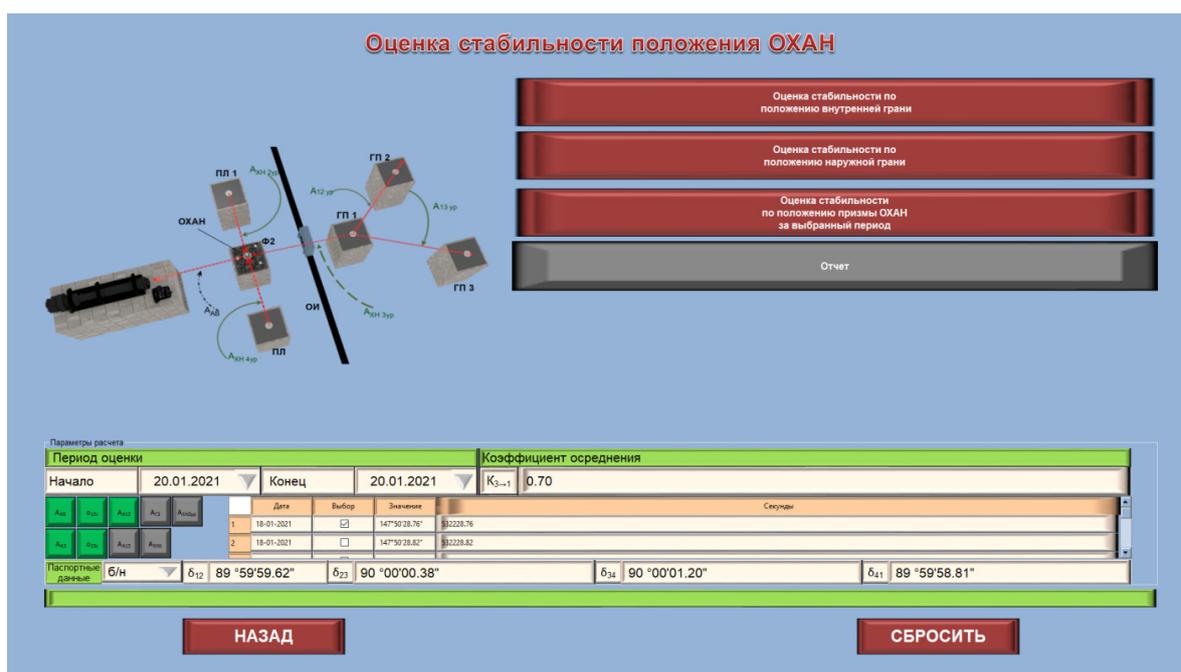


Рис. 4. Вид окна модуля «Оценка стабильности ОХАН»

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

бранный период предполагает ввод периода проведения оценки (начало и конец). В этом случае оцениваются все пять допусков выражений (1).

При оценке стабильности положению наружной грани из базы данных выбирают параметры, по которым проводится оценка стабильности в соответствии с выражениями (2) и (3). Дополнительно вводятся аттестованные значения углов между гранями призмы  $\delta_{ij}$ , что обеспечивает пересчет значений азимута с внутренней грани на наружную и наоборот. По окончании расчетов СПО формирует для вывода на печать.

### Заключение

Введение в состав государственного первичного специального эталона метрологического обеспечения средств измерения азимута дополнительных опорных направлений обеспечивает повышение информационной достоверности определения и хранения азимутов этих направлений.

### Литература

1. Беркович С.Б. Опыт создания комплекса метрологического обеспечения средств высокоточных измерений азимута / Беркович С.Б., Бикмаев Р.Р., Котов Н.И., Махаев А.Ю., Шолохов А.В. // Известия института инженерной физики, 2021. №3(61). С.14-19.
2. Гайворонский С.В. Автоматическая система определения астрономического азимута / Гайворонский С.В., Беркович С.Б., Котов Н.И., Махаев А.Ю., Садеков Р.Н., Цодокова В.В. // Метрология. Ежеквартальное приложение к научно-техническому журналу «Измерительная техника», 2015. №1. С.11-20.
3. ГОСТ Р 8.596-2002 ГСИ. Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения. М.: Госстандарт, 2012.
4. ГОСТ 19223-90. Светодалномеры геодезические. Общие технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1990. 14 с.
5. Котов Н.И. Метрологическое обеспечение средств измерений азимута / Н.И. Котов, А.В. Костюков, А.Н. Фельдшеров, С.Е. Чернышев, А.В. Яшин // Известия института инженерной физики, 2019. №2(56). С.16-19.
6. Котов Н.И. Применение автоматической системы определения астрономического азимута для калибровок высокоточных гироскопических приборов азимутального ориентирования / Н.И. Котов, С.Б. Беркович, А.Ю. Махаев, Д.В. Смирнов, А.Н. Царьков // XX международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация». Тезисы докладов. М.: Изд-во МАИ, 2015. С.138-140.
7. Комплекс астрономического универсала АУ-01. Инструкция по эксплуатации АУ-01.00.000 ИЭ. М.: МО СССР, 1987. 179 с.
8. Махаев А.Ю. Анализ условий высокоточного азимутального ориентирования спутниковой геодезической аппаратурой / А.Ю. Махаев, А.С. Бамбиза // Известия Института инженерной физики, 2017. №1(43). С. 15-19.
9. Метрологическое обеспечение геодезических средств общего назначения в войсковых условиях / Беркович С.Б., Махаев А.Ю., Котов Н.И., Минеев Б.И., Фельдшеров А.Н., Чернышев С.Е. // Материалы X Всероссийской научно-технической конференции «Метрологическое обеспечение обороны и безопасности в Российской Федерации». Пос. Поведники Московской обл., 2014. С.131-135.
10. Определение азимута длиннобазисных образцовых направлений. Методика института МИ БГЕИ 12-91. М.: ФГУП «ЦНИИГАиК», 1991.
11. Руководство по астрономо-геодезическим работам при топогеодезическом обеспечении войск. Ч. 2. Астрономические и гравиметрические работы. М.: ВТС, 1982. 427 с.
12. Руководящий технический материал РТМ 68-8.20-93. Полигоны геодезические Общие технические требования. Введен 1.09.94. М.: ЦНИИГАиК, 1994. 9 с.
13. Чернов И.В. Исследование возможности определения азимута с использованием аппаратуры потребителя космических навигационных систем // Научные технологии в космических исследованиях Земли, 2016. Т. VIII. №3. С. 14-20.
14. Leica GS14. Руководство пользователя. Техническая документация «Leica Geosystems AG», Швейцария. 124 с.
15. Leica MS50/TS50/TM50. Руководство пользователя. Техническая документация «Leica Geosystems AG», Швейцария. 114 с.
16. Официальный сайт АНО «Институт инженерной физики»: URL: <https://iifrf.ru/>
17. Официальный сайт ФГУП «ВНИИФТРИ»: URL: <http://www.vniiftri.ru/>

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 004.896 159.964.22

## ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ ЕСТЕСТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В БИОФИЗИЧЕСКОМ ПСИХОАНАЛИЗЕ REPRESENTATION OF THE STRUCTURE OF NATURAL INTELLIGENCE IN BIOPHYSICAL PSYCHOANALYSIS

**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  
E-mail: 1253vadim@mail.ru

**Владимир Валерьевич Коломбет**  
консультант-программист  
Банк России  
Адрес: 107016, Москва, ул. Неглинная, д. 12, к. В  
Тел.: +7 (4967) 70-56-30  
E-mail: kolombet@gmail.com

### Аннотация

В статье представлены некоторые результаты исследования мышления посредством т.н. биофизического варианта психоаналитического метода свободных ассоциаций. Оказывается, что спектр словесных ассоциаций, возникающих на любую тему, ставшую объектом внимания, не только дискретен, что очевидно, но и тесно связан с настроением, которое со сменой тем ассоциаций изменяется крупными скачками, т.е. тоже дискретно. В итоге выясняется, что в мышлении человека существует восьмерка закономерно расположенных состояний настроения. Внимание и настроение можно уподобить строчной и кадровой разверткам телевизионного раstra, где в «кадровой развертке» обычно всего восемь строк, т.е. восемь лейтмотивов ассоциаций. Учет связи внимания и настроения ведет к уточнению взгляда на свойства т.н. человеческого фактора, нередко проявляющегося в авариях и техногенных катастрофах. С другой стороны, понимание особенностей структуры естественного интеллекта человека может оказаться основой для использования в робототехнике и в новых версиях искусственного интеллекта.

**Ключевые слова:** искусственный интеллект, естественный интеллект, круг ментальных состояний, экстремумы настроения, дискретный спектр ассоциаций

### Summary

The article presents some results of a study of thinking through the so-called. biophysical version of the psychoanalytic method of free association. It turns out that the spectrum of verbal associations that arise on any topic that has become the object of attention is not only discrete, which is obvious, but is also closely related to mood, which changes in large leaps with the change of topics of association, i.e. also discrete. As a result, it turns out that in human thinking there are eight naturally located mood states. Attention and mood can be likened to the horizontal and vertical scans of a television raster, where the «frame scan» usually has only eight lines, i.e. eight leitmotifs of associations. Taking into account the connection between attention and mood leads to a clarification of the view of the so-called properties. human factor, often manifested in accidents and man-made disasters. On the other hand, understanding the structure of human natural intelligence may be the basis for use in robotics and new versions of artificial intelligence.

**Keywords:** artificial intelligence, natural intelligence, range of mental states, mood extremes, discrete spectrum of associations

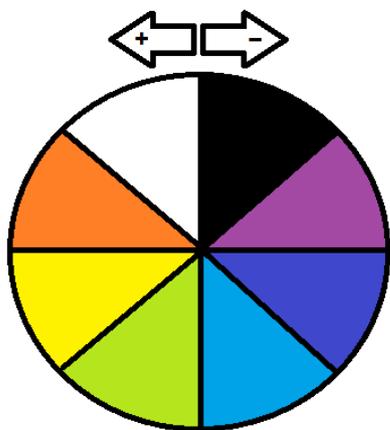
### Введение

Традиционные задачи, в частности, задачи, следующие из традиционного взгляда на природу т.н. человеческого фактора, на повышение возможностей искусственного интеллекта и пр. пока ещё не учитывают достижений недавно раз-

витого т.н. биофизического варианта психоанализа [1]. В этом виде психоанализа показано, что дискретный спектр ассоциаций, возникающих на любую тему, занявшую место в качестве лейтмотива цепи ассоциаций вплоть до момента следующего переключения темы, тесно связан с на-

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

строением, которое с изменениями тем ассоциаций изменяется крупными скачками, от уровня до уровня, т.е. дискретно. Эти дискретные уровни и внимания, и настроения связаны между собой аналогично тому, как связаны строчная и кадровая развертки телевизионного раstra. В частности, обнаруживается сканирование восьмерки закономерно расположенных состояний настроения («строк кадровой развертки»). На *рисунке 1* этот вывод оформлен графически в виде т.н. круга ментальных состояний. Безэмоциональные входное и выходное ментальные состояния, позволяющие на спокойном эмоциональном фоне наблюдать физическую реальность (входное ментальное состояние «Бодствование») и спокойно корректировать ее, меняя своё поведение (выходное ментальное состояние «Действие»), изображены как бесцветные сектора: белый и черный. Остальные ментальные состояния – по сути, наша память – концентрируются возле центров положительных и отрицательных эмоций. Положительный центр помогает нам – самовоспроизводимся автоматам [2] – размножиться, а отрицательный выжить. Положительный центр/сектор и пара его соседей окрашены на *рисунке 1*



**Рис. 1.** Круг ментальных состояний (круг настроений). Безэмоциональные ментальные состояния показаны как два бесцветных сектора, остальные ментальные состояния окрашены в цвета радуги: они связаны с эмоциями и, следовательно, с хорошим и плохим настроением разной интенсивности [3-8]. Максимумы эмоций приходятся на желтый и синий секторы

в теплые тона: оранжевый, желтый и зеленый, а отрицательный центр/сектор и его ближайшие соседи окрашены в холодные цвета: голубой, синий и лиловый.

Предметом этой статьи является популяризация метода сканирования состояний настроения и подробное объяснение способа обработки итогов сканирования.

### Результаты

Картину своего собственного мышления в рамках биофизического психоанализа каждый легко определит самостоятельно, используя Интернет-ресурс [9]. Там приведена 300-страничная монография первого автора этой статьи, дающая подробное описание процесса тестирования, а также множество примеров. На том же сайте приводится автоматизированный тест, который позволяет облегчить и стандартизовать процесс тестирования.

На *рисунке 2* представлены характерные фрагменты процесса мышления: **pi**, **po**, **ni** и **no**, на которые, как оказалось, легко распадаются результаты тестирования.

Здесь буквы **p** и **n**, происходят от слов, соответственно, **positive** и **negative**, а буквы **i** и **o** от **in** и **out**. (см. *рисунк 2*). Например, первый фрагмент – **pi** – расшифровывается как **positive in**, т.е. как «находящийся в области центра положительного настроения, входной фрагмент»). Знаки + и – указывают на присутствие «лишних» лейтмотивов ассоциаций и на их недостаток. А для удобства все экспериментально полученные формулы, описывающие последовательности переключений настроения прерываются пробелом в момент пересечения настроением верхней точки ментального круга. Действительно, вместо трудно воспринимаемого **ninoninopipopi+** лучше писать удобочитаемое **nino nino pipo pi+**. При разбиении на указанные фрагменты и при интерпретации экспериментальных ментограмм существенно используется когда-то для нас неожиданная, а впоследствии многократно подтвердившаяся очень жесткая связь с моментом смены настроения момента смены объекта внимания (т.е. момента смены лейтмотива темы



**Рис. 2.** Четверка характерных фрагментов (**pi**, **po**, **ni** и **no**), выявляемая при сканировании мышления т.н. биофизическим вариантом психоаналитического метода свободных ассоциаций [2-8]. Серии стрелочек внутри кружков указывают на расположение и на направление переключений настроения

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

**Таблица 1**

Раскрашенный (как на *рисунке 1*) пример результата тестирования, на который наложено разбиение на 4-строчные фрагменты, изображенные на *рисунке 2*. Слева – лейтмотивы, справа – раскрашенные ассоциации к ним

<b>po</b>	
<b>Любовь:</b>	Жизнь, Мечты, Отношения, Люди, Объятия, Забота,
<b>Забота:</b>	Тепло, Бережно, Уют, Помощь, Поддержка,
<b>Поддержка:</b>	Плечо, Опора, Друг, Брат, Опора,
<b>Опора:</b>	Рука, Спина, Тело, Я, Пара,
<b>pi</b>	
<b>Пара:</b>	Второй, Друг, Муж, Семья, Друзья,
<b>Друзья:</b>	Сила, Развитие, Отдых, Разговоры, Путешествия, Встреча,
<b>Встреча:</b>	Свидание, Поход, Прогулка, Дружба, Любовь, Приветствие,
<b>Приветствие:</b>	Рукопожатие, Объятия, Привет, Встреча, Знакомство,
<b>po</b>	
<b>Знакомство:</b>	Неловкость, Новое, Имя, Человек, Разговор,
<b>Разговор:</b>	Свидание, Встреча, Диалог, Визави, Доверие,
<b>Доверие:</b>	Вера, Тепло, Руки, Близко, Раскрываться, Говорить, Молчать, Признание,
<b>Признание:</b>	Правда, Истина, Честность, Чувства,
<b>pi</b>	
<b>Чувства:</b>	Злость, Гнев, Грусть, Радость, Счастье,
<b>Счастье:</b>	Мурашки, Сердце, Тепло, Цветы, Ощущения, Любовь,
<b>Любовь:</b>	Радость, Согласие, Принятие, Счастье, Поцелуй,
<b>Поцелуй:</b>	Нежность, Дети, Мужчина, Свидание, Чувства, Касание,
<b>po</b>	
<b>Касание:</b>	Пальцы, Нежность, Руки, Тело, Душа, Любовь,
<b>Любовь:</b>	Касаться, Дружба, Страсть, Сердце, Нежность, Жизнь,
<b>Жизнь:</b>	Росток, Рост, Движение, Кризис, Счастье, Принятие,
<b>Принятие:</b>	Жизнь, Развитие, Плохое, Хорошее, Правда, Боль, Радость,
<b>ni</b>	
<b>Радость:</b>	Чувство, Эмоция, Эндорфины, Серотонин, Мурашки, Улыбка, Смех, Момент,
<b>Момент:</b>	Здесь, Сейчас, Жизнь, Чувствовать, Тело, Мир,
<b>Мир:</b>	Планета, Человек, Рождение, Смерть, Наука, Созидание, Разрушение,
<b>Разрушение:</b>	Крах, Обнуление, Осколки, Развалины, Пепел, Остов,
<b>no</b>	
<b>Остов:</b>	Корабль, Обломки, Развалины, Скелет, Основа,
<b>Основа:</b>	База, Фундамент, Знания, Скелет, Спина,
<b>Спина:</b>	Опора, Позвоночник, Мышцы, Сила, Род,
<b>Род:</b>	Семья, Колено, Родители, Сила, Энергия, Дети,
<b>pi</b>	
<b>Дети:</b>	Семья, Муж, Любовь, Ответственность, Коляска, Школа, Обучение,
<b>Обучение:</b>	Уроки, Знания, Наука, Опыт, Жизнь, Развитие, Созидание,
<b>Созидание:</b>	Создавать, Рождение, Новое, Наука, Реализация, Предназначение,
<b>Предназначение:</b>	Реализация, Намерение, Зов, Природа, Дело, Душа, Сердце,
<b>po</b>	
<b>Сердце:</b>	Душа, Тепло, Кровь, Любовь, Доверие, Семья,
<b>Семья:</b>	Жизнь, Свет, Любовь, Дружба, Доверие, Забота,
<b>Забота:</b>	Уют, Помощь, Поддержка, Друг, Нежность,
<b>Нежность:</b>	Любовь, Касаться, Обнимать, Любить, Заботиться,

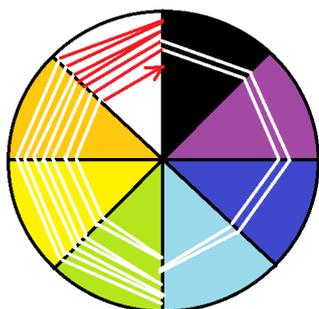
Расшифровку этого теста можно записать в виде ментального кода **po piro piro pino piro** или представить графически в виде *рисунка 3*.

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

ассоциирования). Оказалось, что настроение имеет восемь характерных позиций, и они закономерно сменяют друг друга. Технической аналогией здесь вполне может быть серия дискретных положений вала шагового двигателя. Такой вот «механизм», оказывается, встроен в наше мышление [3-8].

Примером результата тестирования может быть *таблица 1* (см. также *рисунок 3*).

На основе анализа тональности слов посредством метода VADER накоплена следующая числовая оценка положительного эмоционального содержания слов (левой половины рисунка) в этом тесте: 0.13, 0.25, 0.43, 0.18. Как и предполагалось, в левой половине круга ментальных состояний максимум настроения пришелся на желтый сектор. Вычисления выполнены посредством искусственного интеллекта – русского чат-бота, использующего языковую модель gpt-3.5-turbo для численных оценок эмоционального содержания ассоциаций в тестах. Аналогич-



**Рис. 3.** Графическая форма ментального кода  
po pipo pipo nino pipo

**Таблица 2**

Начальный трёхнедельный фрагмент тестирования, выполнявшегося волонтером каждым вечером с 18 декабря 2010 года по 28 апреля 2011 года

Дата опыта	Код ментограммы
18.12.2010	nipo+
19.12.2010	nino+
20.12.2010	+nino+ +nino+ +
21.12.2010	pino nino
22.12.2010	nipo pipo--
23.12.2010	pino nino
24.12.2010	pipo pipo
25.12.2010	nino nipo pino-
26.12.2010	nipo pino
27.12.2010	nino+
28.12.2010	pino nino pipo+
29.12.2010	+nipo nino pipo--
30.12.2010	++nipo nino pipo++
31.12.2010	++pino pino pi/po
01.01.2011	+nipo+ +pino
02.01.2011	+nipo++ ++pino++
03.01.2011	--nipo pino pino++
04.01.2011	nino nino pipo ni+
05.01.2011	-no pipo nino pipo nino--
06.01.2011	nipo pino pipo++
07.01.2011	+++pino nipo

ное представление всего круга см. на *рисушке 4*. Для этого использован (см. *таблицу 2*) фрагмент серии ментальных кодов, извлеченный из многомесячной серии тестов волонтера.

В этом примере достаточно информации для накопления удовлетворительных численных оценок по всем секторам ментального круга (см. *рисунок 4*).

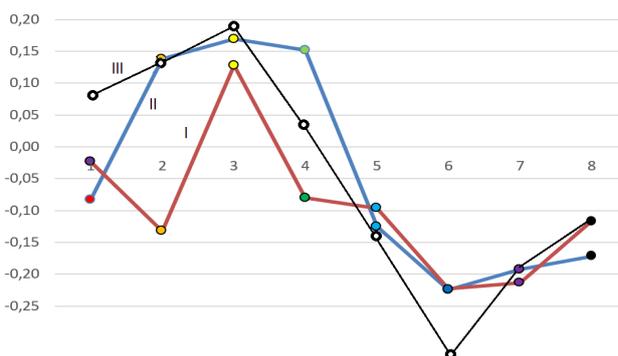
На *рисушке 4* хорошо выражены ожидаемые экстремумы настроения в третьем и в шестом секторах. Достоверное падение настроения во втором секторе, искажающее правильную форму волны, можно, по-видимому, связать с заболеванием волонтера. Волны накоплены по 21 тесту, коды которых представлены в *таблице 2*. Вычисления выполнены посредством чат-бота, а также программы на языке **python**, использующей метод VADER:

```
import nltk
from nltk.sentiment.vader import SentimentIntensityAnalyzer
```

```
# Инициализируем анализатор тональности
sid = SentimentIntensityAnalyzer()
```

```
# Список слов для анализа
words = ["Cars, Rabbit, Plastic, Teddy Bear, Toy Soldiers"]
```

```
# Проходимся по каждому слову, оцениваем его тональность и выводим результат
for word in words:
    ss = sid.polarity_scores(word)
    print(f'{word}: {ss}»)
```



**Рис. 4.** Волна настроения, располагающаяся вдоль восьмёрки секторов ментограммы. На первой неделе (I) ежедневного тестирования правильная форма кривой была искажена сильной подавленностью настроения во втором секторе. На второй неделе (II) восстановилось правильное волнообразное изменение настроения.

На третьей неделе (III) подтвердилось, что следы первоначального искажения исчезли. По вертикальной оси представлено настроение, достигающее при предельно плохих ассоциациях значения -1 и при предельно хороших значения +1

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

### Обсуждение результатов

Из приведенных примеров следует важный прикладной момент: можно сказать, что нами представлен новый способ неинвазивного исследования мышления человека. Кроме очевидно-го использования в медицине, это также способ, например, выявления готовности операторов сложных систем к выполнению ответственной работы.

Второй возможный прикладной момент под-сказывается наблюдением довольно быстрого восстановления правильного волнообразного изменения настроения по мере накопления опыта ежедневных тестирований. По-видимому, эта дополнительная умственная деятельность дисциплинирует мышление.

Пара разнополярных центров настроения в круге ментальных состояний (*рисунк 1*) вос-ходит в эволюционном плане к двум таксисам одноклеточных организмов – положительному и отрицательному. Положительный обеспечи-вает питание и возможное размножение, а отрицательный – избегание уничтожения, смерти. Обеспечение аналогов этих таксисов в работе искусственного интеллекта и его гомологов мо-жет привести при условии появления самораз-множения искусственных систем к большим успехам и, соответственно, к большим угрозам.

### Литература

1. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Елистратов А.В.. Психодиагностика как биофизический метод // Изве-

стия Института инженерной физики, 2023. №4 (65). С.2-5.

2. Коломбет В.А., Панчелюга В.А., Лесных В.Н. Самовоспроизводящиеся автоматы во вселен-ной: жизнь, универсальная система утраиваю-щихся периодов, фундаментальные взаимодей-ствия // Известия Института инженерной физи-ки, 2022. №2(64). С.2-4.

3. Коломбет В.А. Ментальные миры // Сознание и физическая реальность, 1997. Т. 2. №4. С. 15-24.

4. Коломбет В.А. Трансфизические миры. В кн.: В.А. Коломбет. Трансфизические миры. Про-исхождение имен. М.: КРОН-ПРЕСС, 2001. С. 8-525.

5. Коломбет В.А. «Синдром Стендаля» в свете гипнографии // Прикладная психология и пси-хоанализ, 2003. №2. С. 11-27.

6. Коломбет В.А. ВММ – вычислительная маши-на мозга // Вестник Калужского университета, 2006. №2. С. 21-29.

7. Коломбет В.А. Введение в гипнографический психоанализ. М.: ООО Мэйлер, 2008. 240 с.

8. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Елистратов А.В., Тараненко А.М.. Базовый ментальный сценарий и его использование при оценке качества рабо-ты операторов сложных систем / XLI Всеросий-ская НТК «Проблемы эффективности и безопас-ности функционирования сложных технических и информационных систем». Филиал ВА РВСН (г. Серпухов), 2022. С. 63-67.

9. Коломбет В.В. Сайт [poiskgeniya.ru](http://poiskgeniya.ru) в сети Ин-тернет.





УДК 621.391.6

## НЕЙРОННЫЕ МОДУЛИ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В КАНАЛАХ С ГРУППИРУЮЩИМИСЯ ОШИБКАМИ NEURAL SIGNAL PROCESSING MODULES IN CHANNELS WITH GROUPED ERRORS

Владислав Валентинович Квашенников

доктор технических наук

ведущий научный сотрудник

АО «КНИИТМУ»

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

Тел.: 8 (910) 864-52-75

E-mail: kvashienvv@mail.ru

### Аннотация

В статье описаны синтез и оптимизация нейронных модулей коррекции искажений и приема сигналов радиосвязи. Нейронные сети также могут выполнять декодирование помехоустойчивых сигнально-кодовых конструкций, что обеспечивает прием сигналов в условиях аддитивных шумов и замираний. Параллельная организация нейронных модулей обеспечивает высокое быстродействие обработки сигнала, а их обучаемость и универсальность позволяют декодировать большое число различных сигнально-кодовых конструкций. Аддитивная природа сигнально-кодовых конструкций позволяет выполнять распознавание по частям, упрощающее обработку сигналов. Сигнально-кодовые конструкции имеют многоуровневую иерархическую структуру, что также снижает сложность нейронных модулей. Описано построение искусственной нейронной сети для приема сигналов QAM-128 в каналах с релейскими замираниями.

**Ключевые слова:** корректоры искажений, оптимальный корреляционный прием, декодеры помехоустойчивых кодов, нейронные модули, весовые коэффициенты нейронов.

### Summary

The article describes the synthesis and optimization of neural modules of distortion correlation and reception of radio signals. Neural networks can also decode noise-resistant signal-code structures, which ensures the reception of signals in conditions of additive noise and fading. The parallel organization of neural modules ensures high signal processing speed, and their trainability and universality allow decoding a large number of different signal-code constructions. The additive nature of signal-code constructions makes it possible to perform recognition in parts, simplifying signal processing. Signal-code constructions have a multilevel hierarchical structure, which also reduces the complexity of neural models. The construction of an artificial neural network for receiving QAM-128 signals in channels with Rayleigh fades is described.

**Keywords:** distortion correctors, optimal correlation reception, decoders of noise-resistant codes, neural modules, weighting coefficients of neurons.

### Введение

Одним из важнейших направлений совершенствования систем связи является использование когнитивных принципов построения аппаратуры. В настоящее время искусственный интеллект успешно применяется во многих приложениях, в том числе для обработки сигнала в условиях сложной помеховой обстановки в канале связи [1]. Современные сигнально-кодовые конструкции, для приема которых используются корректоры искажений, демодуляторы сигналов и декодеры помехоустойчивых кодов, реализованные на быстродействующей элементной базе, обеспечивают высокую скорость обработки сигналов при достаточной помехоустойчивости.

Однако, несмотря на все достоинства такой связи, ее реализация требует применения мощных вычислителей и недостаточно универсальна.

В свое время методы оптимального корреляционного приема были предложены для приема сигналов в каналах с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ) [2]. Реальные каналы чаще являются каналами с сосредоточенными помехами, для приема в которых применяют гармонические корректоры, компенсирующие соответствующие искажения в канале. Адаптивные эквалайзеры (выравниватели) изменяют свои параметры в зависимости от качества канала [3]. Развитием таких адаптивных методов являются интеллектуальные подходы к распознаванию

сигналов. В некоторой степени принципы интеллектуального распознавания сигналов могут быть реализованы искусственными нейронными сетями (ИНС). ИНС являются высокопроизводительными отказоустойчивыми вычислительными устройствами с параллельной организацией работы [4]. Также их можно определить как универсальные, обучаемые и инвариантные классификаторы образов. В качестве образов в системах связи выступают сигнально-кодовые конструкции (СКК). Нейросетевые классификаторы СКК являются более устойчивыми, в тех случаях, когда распределения помех порождены нелинейными процессами и являются негауссовыми [5].

В настоящей статье описано распознавание СКК в ИНС. Искажениям сигналов в канале с некоторым приближением соответствуют инвариантные (аффинные) преобразования сигналов. При подходящем выборе весовых коэффициентов ИНС, реализуются адаптивные корректоры искажений, а при согласовании весовых коэффициентов с сигналом реализуются линейные согласованные фильтры и осуществляется оптимальный корреляционный прием сигналов. Другой важной функцией, присущей ИНС, является способность декодирования помехоустойчивых кодов с коррекцией ошибок и стираний, восстановление информационной части кода и вычисление эффективного кода СКК. ИНС состоят из однотипных нейронных модулей, каждый из которых выполняет прием своего сигнала. Аддитивная природа СКК позволяет выполнять распознавание по частям, что упрощает распознавание сигналов и снижает сложность ИНС.

## 1. Обработка сигналов в нейронных модулях

На вход нейрона подается  $m$ -мерный вектор  $x$ , компонентами которого являются действительные числа  $x_1, x_2, \dots, x_m$ . Выход нейрона можно представить функцией

$$y = f(b + \sum w_i \times x_i),$$

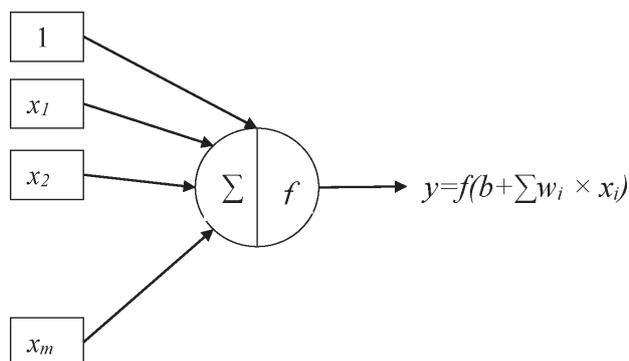


Рис. 1. Модель нейрона

где  $W = w_1 w_2 \dots w_i$  – вектор весов соответствующих входов;

$b$  – свободный член.

Нейрон состоит из линейной части (операции векторного умножения и сложения) и нелинейной части, представленной решающей функцией  $f(x)$ . На выходе нейрона вычисляется действительное число. Схема модели нейрона показана на рисунке 1.

ИНС в настоящее время могут решать достаточно большое число различных задач, среди них оптимизация, аппроксимация, прогноз. Существуют различные подходы к использованию ИНС для приема сигналов [6-8]. При демодуляции и декодировании наиболее интересной выглядит задача классификации, которая состоит в определении принадлежности входного образа (СКК), представленного вектором признаков, к одному или нескольким классам. Сети с прямой связью довольно хорошо решают задачи классификации [9].

**Коррекция частотных искажений.** Во многих каналах присутствуют сосредоточенные помехи, например межсимвольные искажения (МСИ) сигнала. Для уменьшения сосредоточенных помех на входе демодулятора устанавливаются выравнивающий («обеляющий») фильтр, корректирующий характеристики канала [10]. В канале на аналоговый сигнал  $u(t)$  воздействуют помехи. В канале с группированием ошибок на сигнал воздействуют аддитивная и мультипликативная помехи

$$z(t) = \mu(t) \cdot u(t) + n(t).$$

Стационарный случайный процесс  $z(t)$  с ограниченной полосой представляется последовательностью равномерно выбираемых отсчетов

$$z_i = \mu_i \cdot u_i + n_i, \quad i = 1..m.$$

Корректор искажений вычисляет взвешенную сумму отсчетов в скользящем окне приема [11]

$$y_i = \sum_{i=1}^v w_i \cdot z_i = \sum_{i=1}^v w_i \cdot \mu_i \cdot u_i + \sum_{i=1}^v w_i \cdot n_i.$$

Настройка весовых коэффициентов корректора  $w_i$  осуществляется по критерию минимума среднеквадратичной ошибки (Евклидова расстояния)

$$D^2 = \sum_{i=1}^m (y_{ii} - \sum_{i=1}^v w_i \cdot \mu_i \cdot u_i - \sum_{i=1}^v w_i \cdot n_i)^2,$$

где сумма отсчетов эталонного сигнала

$$y_{ii} = \sum_{i=1}^v u_i.$$

При нормальном распределении аддитивной помехи с нулевым математическим ожиданием и достаточно большом числе отсчетов, исходя из закона больших чисел, приближенно

$$\sum_{i=1}^m w_i \cdot n_i = 0$$

для любого набора весовых коэффициентов.

Тогда минимум среднеквадратичной ошибки (СКО) достигается при условии

$$w_i = \frac{1}{\mu_i}.$$

На практике веса входов выбирают в процессе обучения, чтобы обеспечить необходимый выход при заданном входе. Для обучения чаще используется алгоритм обратного распространения ошибки, являющегося разновидностью градиентного спуска в пространстве весов, вычисляющего минимум суммарной ошибки сети [12]

$$\Delta W = -\alpha \frac{dE}{dW}, \quad E = \frac{1}{2} \sum (y_i - t_i)^2,$$

где  $t_i$  – выход сети при передаче обучающих (тестовых) сигналов.

Коррекция весов распространяется в обратном направлении от выходов к входам, через веса, соединяющие нейроны.

**Демодуляция сигнала.** После коррекции искажений выполняют демодуляцию сигналов. При посимвольном приеме принимается решение, что передавался эталонный сигнал  $y_j$ , если СКО имеет минимальное значение

$$y_j = \arg \min D_j, \quad j = 1..l,$$

где  $l$  – число эталонных сигналов.

Для АБГШ минимальная величина СКО соответствует максимальному значению функции корреляции принятого и эталонных сигналов [13]. Функция корреляции вычисляется линейным фильтром на ИНС с согласованными весовыми коэффициентами. После корректора искажений будет канал с АБГШ и демодуляция в ИНС соответствует решению оптимального корреляционного приемника.

**Декодирование с исправлением ошибок и стираний.** ИНС могут декодировать помехоустойчивые коды [14]. Сигналами передаются символы помехоустойчивого кода

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

Любые два кодовых слова отличаются между собой не менее, чем на минимальное кодовое расстояние

$$d_{\min} \geq d(A_i, A_j),$$

что позволяет корректировать определенное число ошибочных и стертых символов кода. При «мягком» декодировании символы кода характеризуются некоторыми действительными числами, определяющими достоверность (вероятность правильного приема) символов  $0 \leq \alpha_i \leq 1$ .

$$A = \alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_n, \quad \alpha_i \in R.$$

Квадрат расстояния Евклида между  $i$ -м и  $j$ -м кодовыми словами

$$d^2 = \sum_{k=1}^n (\alpha_{ik} - \alpha_{jk})^2.$$

Пусть принято кодовое слово  $B = \beta_1 \beta_2 \dots \beta_n$ , тогда квадрат расстояния Евклида между переданным и принятым словом с учетом весовых коэффициентов

$$d_k^2 = \sum_{k=1}^n (\alpha_{ik} - w_{ik} \cdot \beta_k)^2, \quad i = 1..M,$$

где  $M$  – число кодовых слов.

По критерию минимума СКО весовые коэффициенты, согласованные с переданным словом, получают из равенства

$$\alpha_{ik} - w_{ik} \cdot \beta_k = 0,$$

отсюда

$$w_{ik} = \frac{\alpha_{ik}}{\beta_k}, \quad \beta_k > 0, \quad i = 1..M, \quad k = 1..n.$$

Для ИНС с согласованными весовыми коэффициентами СКО равно 0. Декодирование принятого кода будет заключаться в выборе того кодового слова, для которого расстояние будет минимальным. При помехоустойчивом кодировании в канале с АБГШ, который образуется после корректора, декодирование в ближайшее кодовое слово по критерию СКО есть декодирование по максимуму правдоподобия [15]. Это справедливо и для декодирования в ИНС с согласованными весовыми коэффициентами.

*Утверждение.* Декодирование принятого кодового слова в ИНС с согласованными весовыми коэффициентами в канале с АБГШ является декодированием по максимуму правдоподобия.

*Доказательство.* Оптимальный декодер выбирает кодовое слово  $A$ , которое максимизирует условную вероятность  $P(A/B)$ . По формуле Байеса

$$P(A/B) = \frac{P(A, B)}{P(B)} = P(B/A) \frac{P(A)}{P(B)}.$$

Если предположить, что все сообщения равновероятны, то максимальное значение  $P(A/B)$  достигается при максимальном значении  $P(B/A)$ . Поскольку шумы, искажающие различные символы, независимы и являются гауссовскими, можно записать  $P(B/A)$  в виде произведения  $n$  гауссовских плотностей вероятностей

$$P(B/A) = \prod_{i=1}^n \left[ \frac{1}{(\pi N_0)^{0.5}} \right] \cdot \exp \left[ -\frac{(\beta_i - \alpha_i)^2}{N_0} \right] = \left[ \frac{1}{(\pi N_0)^{0.5}} \right]^n \cdot \exp \left[ \sum_{i=1}^n -\frac{(\beta_i - \alpha_i)^2}{N_0} \right].$$

Это выражение максимально, когда расстояние

$$d^2 = \sum_{i=1}^n (\beta_i - \alpha_i)^2$$

минимально, что выполняется для ИНС с согласованными весовыми коэффициентами.

Таким образом, ИНС при согласованном выборе весовых коэффициентов реализует прием сигналов, включающий:

- коррекцию частотных искажений;
- оптимальную демодуляцию сигналов;
- декодирование по максимуму правдоподобия.

ИНС будет содержать несколько слоев нейронов, выполняющие перечисленные выше функции приемника. На выходе слоя демодулятора необходимо выбирать минимальное значение, аналогичную операцию необходимо также выполнять на выходе декодера.

При большом числе сигналов и мощности помехоустойчивого кода количество нейронов и связей в соответствующем слое может быть довольно большим. В ИНС осуществляется сравнение сигналов, поступающих на вход сети, с эталонными сигналами (образами) на основе выбранной метрики. Эталонные образы задаются весовыми коэффициентами ИНС. Для одного эталонного сигнала число сравнений равно числу отсчетов сигнала  $n$ . Пусть длина эффективного кода эталонного сигнала есть  $k$ , тогда количество эталонных сигналов будет  $2^k$ . Если на входе ИНС имеется последовательность длины  $n$ , а на выходе – эффективный код сигнала длины  $k$ , то число арифметических операций при вычислении эффективного кода сигнала оценивается

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

Сложность ИНС растет по линейному закону в зависимости от длины входной последовательности, и по экспоненциальному закону – от длины эффективного кода сигнала. Сложность возрастает с увеличением числа сигналов и числа отсчетов сигнала. Классификатор образов становится проще при уменьшении числа эталонных образов. Снизить сложность ИНС возможно за счет сегментации и учета многоуровневой иерархической структуры СКК.

## 2. Сегментация и иерархическая структура СКК

Распознавание сигналов в ИНС можно выполнять по частям. Отсчеты сигнала, определяющие весь сигнал в целом или его часть, будет образом. Полный образ сигнала состоит из множества образов элементов сигнала. Количество эталонных образов частей сигнала меньше, чем количество эталонных образов полного образа сигнала, поэтому распознавать сигнал по частям обычно проще, чем распознавать весь сигнал в целом. Прием сигнала по частям проигрывает по верности приему сигнал по всем отсчетам (в целом), но проще реализуется. При задании сигналов с достаточной избыточностью верность приема уменьшится незначительно.

Входные воздействия представляются в виде отсчетов сигнала

$$A = \alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_n, \quad \alpha_i \in R, \quad i = 1 \dots n.$$

Входные последовательности обычно представляют собой разрешенные последовательности (образы), соответствующие СКК. Входные

отсчеты, как правило, задаются с большой избыточностью, что позволяет правильно распознавать СКК, даже при ошибках и стираниях (неполном задании) отсчетов. Разрешенные последовательности окружены последовательностями с корректируемыми ошибками и стираниями, образующими сферу образа. При числе ошибок и стираний за пределами корректирующей способности кода возможны запрещенные последовательности, которые ИНС не воспринимаются (стираются). С некоторым приближением образы сигнала можно считать стохастическими помехоустойчивыми кодами. Блоковая длина кода СКК составляет

$$N = \sum_{i=1}^n \log_2(\text{int}(w \cdot \alpha_i)),$$

где  $w$  – некоторый нормирующий множитель.

Информационная часть кода СКК есть сжатый код сигнала, содержащий минимально возможное число разрядов. Будем этот код называть эффективным кодом сигнала. Длина эффективного кода определяется только числом эталонных сигналов.

Распознавание сигнала заключается в преобразовании разрешенной входной последовательности символов  $A$  сигнала в эффективный код

$$B = f(A), \quad B = \beta_1 \beta_2 \dots \beta_k, \quad \beta_i \in R, \quad i = 1 \dots k,$$

где  $k < n$  – мощность эталонных СКК меньше мощности принятых сигналов.

Запишем полный образ СКК в виде объединения образов частей сигнала

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

Пусть эталонные коды образа  $A_i$  есть  $B_{i1} B_{i2} \dots B_{i s_i}$  и на выходе  $A_i$  распознается как  $B_{j_i}$ , где  $s_i$  – число эталонных образов образа  $A_i$ . Оценкой эффективного кода полного образа будет конкатенация эффективных кодов составных образов

$$f(A) = f(A_1) f(A_2) \dots f(A_M) = j_1 j_2 \dots j_M.$$

Число двоичных разрядов эффективного кода полного образа не более

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

Коэффициент сжатия образа  $A$  оценивается

$$\nu = \frac{\sum_{i=1}^M n_i}{D},$$

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

При небольшом числе эталонных образов  $s_i$  коэффициент сжатия полного образа может быть довольно большим. Использование эффективных кодов составных образов сокращает число разрядов и упрощает вычисление эффективного кода полного образа.

Составляющие образы в свою очередь можно также сегментировать. Сложные образы, имеющие многоуровневую иерархическую структуру

на основе объединения других образов, можно рассматривать как обобщенные каскадные коды на основе компонентных стохастических кодов [16]. Множество составляющих образов является внешним компонентным кодом обобщенного каскадного кода, а построение сложного образа, используя составляющие образы, есть внутреннее кодирование обобщенного каскадного кода [17].

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

Многоуровневая иерархическая структура ИНС показана на рисунке 2.

Эффективные коды множеств образов объединяются и используются в качестве входной информации следующих преобразований ИНС. Таким образом, сложную ИНС, выполняющую распознавание СКК, можно представить состоящей из нейронных модулей, каждый из которых выполняет преобразования эффективных кодов образов небольшой сложности.

### 3. Пример схемы распознавания КАМ-128

Рассмотрим прием СКК, представляющей собой сигналы многопозиционной квадратурной амплитудной модуляции (КАМ-128). Сначала 4-х битные информационные символы кодируются двоичным кодом Хемминга (7,4,3), исправляющего одну ошибку. Затем выполняется перекодирование символов кода Хемминга кодом Грея и соседние символы на сигнальной диаграмме отличаются на 1 бит. Символы КАМ-128 представляют собой 7-ми разрядные коды Хемминга, расположенные по коду Грея. Скорость кода 0,57.

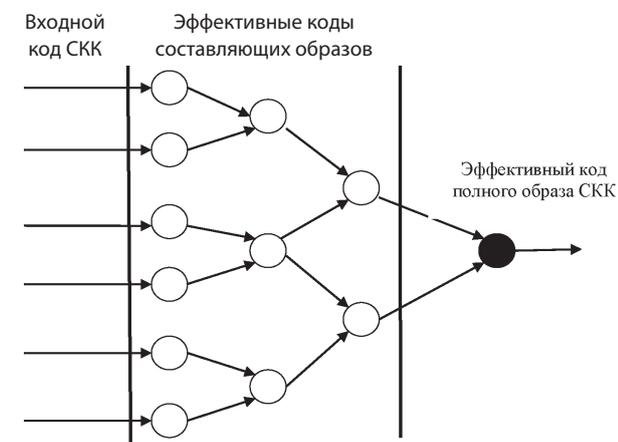


Рис. 2. Иерархическая структура ИНС распознавания СКК

Сигнал на тактовом интервале, равном длительности канального символа  $T$ , принимает одно из 128 возможных значений

$$s_i(t) = A_m(I_i \cos \omega_0 t - Q_i \sin \omega_0 t), \quad t \in (0, T], \quad i = 0..127,$$

где  $A_m = \sqrt{2E_s/T}$  – средняя амплитуда сигнала;  $I_i$  и  $Q_i$  – коэффициенты, определяющие амплитуды квадратурных компонент сигнала;  $\omega_0$  – несущая частота.

На сигнал воздействует аддитивный «белый» шум с нормальным законом распределения и мультипликативные искажения, описываемые релеевским законом распределения [18]

$$w(x) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x}{2\sigma^2}}, \quad (x > 0).$$

Сигнал в цифровой форме на тактовом интервале задается 32 отсчетами  $a_1 a_2 \dots a_{32}$ , по 8 отсчетов на каждую полуволну. Корректор искажений строится на 1 нейроне с 16 входами, на которые в скользящем окне подаются отсчеты сигнала. Весовые коэффициенты корректора вычисляются в процессе обучения, например по алгоритму обратного распространения ошибки. На выходе «обесцвечивающего» линейного фильтра с 16 весовыми коэффициентами будет 16 отсчетов, с некоторым приближением соответствующих сигналу с АБГШ.

Демодулятор представляет собой ИНС, которая с учетом сегментации, делится на две части (назовем их группой нейронов). Первая группа нейронов является классификатором фаз сигналов и содержит 8 нейронов, по числу возможных фазовых сдвигов сигнала. Вторая группа нейронов является классификатором амплитуд сигнала и состоит из 16 нейронов, по числу значений амплитуд сигнала. Нейроны первой группы имеют по 16 входов, а второй группы нейронов – по 7 входов. На выходах первой и второй групп нейронов будут эффективные коды соответственно фаз и амплитуд сигналов. Конкатенация эффективных кодов фазовой и амплитудной модуляции (выходов первой и второй групп нейронов) задает эффективный код полного образа СКК.

Согласованные весовые коэффициенты нейронов демодулятора могут быть вычислены заранее. Весовые коэффициенты первой группы нейронов

$$w_{ij} = A_j \sin(\omega_0 t + \varphi_i), \quad j = 0..15, \quad i = 0..7,$$

где  $i$  – номер фазы и одновременно номер нейрона первой группы нейронов, а  $j$  – номер весового коэффициента  $i$ -го нейрона.

Аналогично, весовые коэффициенты второй группы нейронов

$$w_{ij} = A_j \sin(\omega_0 t + \varphi_i), \quad i = 0..15, \quad j = 0..7,$$

где  $i$  – номер значения амплитуды и одновремен-

но номер нейрона во второй группе нейронов и  $j$  – номер весового коэффициента  $i$ -го нейрона.

Решающее правило первой группы нейронов

$$j_1 = \arg \max \sum_{i=0}^{15} w_{ij} \alpha_{ij}, \quad j = 0..7.$$

где  $j_1$  – номер фазы сигнала.

Аналогично, решающее правило второй группы нейронов

$$j_2 = \arg \max \sum_{i=0}^7 w_{ij} \alpha_{ij}, \quad j = 0..15.$$

Эффективный код полного образа сигнала

$$f(A) = j_1 j_2.$$

Согласованные весовые коэффициенты декодера также могут вычисляться заранее. Порождающая матрица кода Хемминга (7,4,3)

$$G = \begin{pmatrix} 1000101 \\ 0100111 \\ 0010110 \\ 0001011 \end{pmatrix},$$

отсюда слова кода

$$F = 0000000, 0001011, 0010110, 0011101, \\ 0100111, 0101100, 0110001, 0111010 \\ 1000101, 1001110, 1010011, 1011000, \\ 1100010, 1101001, 1110100, 1111111$$

Декодер включает 16 нейронов по числу слов кода Хемминга. При декодировании весовые коэффициенты каждого нейрона совпадают с двоичными символами кодового слова. Это справедливо, как для «жесткого», так и «мягкого» декодирования кода. Например, для слова кода Хемминга 1010011 согласованные весовые коэффициенты будут равны 1010011. На выходе соответствующего нейрона декодера будет сигнал высокого уровня. Номер этого нейрона есть эффективный код сигнала с учетом декодирования.

При демодуляции выполняется сегментация. Оценим выигрыш от сегментации СКК. Число эталонных сигналов равно  $2^7=128$ , и допустим, каждый сигнал задается 32 отсчетами по 8 двоичных разрядов на каждый отсчет, всего будет 256 двоичных разрядов. Тогда сложность ИНС без сегментации

$$N_1 = 2^7 \cdot 256 = 2^{15} = 32768.$$

При сегментации первая группа нейронов содержит 8 нейронов по числу уровней относительной фазовой модуляции, а вторая группа – 16 нейронов по числу уровней амплитудной модуляции. Выходы 8 нейронов первой группы определяют эффективные коды относительной фазовой модуляции, соответствующие 0,45, 90, ..., 315 градусам фазового сдвига. Выходы 16 нейронов второй группы определяют эффективные коды амплитудной модуляции 1...16. Сложность ИНС с сегментацией

$$N_2 = (8+16) \cdot 256 = 3 \cdot 2^{11} = 6144.$$

Таким образом,  $N_2 \ll N_1$  и сегментация сокращает сложность сети.

### Заключение

В статье рассмотрен прием СКК с использованием ИНС. Показано, что ИНС могут реализовать функции адаптивного корректора искажений, демодулятора сигнала и декодера помехоустойчивого кода. Универсальность и обучаемость ИНС позволяют использовать их для приема различных сигналов, начиная с простых двоичных и заканчивая сложными многоосновными СКК. Инвариантность распознавания СКК по отношению к аффинным преобразованиям позволяет принимать сигналы в каналах связи, как с аддитивными, так и с мультипликативными помехами. Для демодулятора и декодера согласованные весовые коэффициенты ИНС могут быть вычислены заранее и обучения не требуется. При большом числе сигналов и мощности помехоустойчивого кода, сложность приемника на ИНС возрастает, однако возможно упрощение приемника при сегментации и иерархическом многоуровневом представлении СКК. Описанный в статье пример построения схемы для приема сигналов КАМ-128 подтверждает возможность реализации приемника СКК на ИНС.

### Литература

1. Малыгин И.В., Бельков С.А., Тарасов А.Д., Усвяцов М.Р. Применение методов машинного обучения для классификации радиосигналов. Труды МАИ. 2017. № 96.
2. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр. Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. 1104 с.
3. Прокис Дж. Цифровая связь. Пер. с англ. / Под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.
4. Галушкин А.И. Нейронные сети: основы теории. Под ред. А.И. Галушкина. М.: ИПРРЖР, 2009. 480 с.
5. Кузнецов А.В. Нейросетевой алгоритм разделения классов телекоммуникационных сигналов / Информационные технологии, 1999. №8. С.15-21.
6. Аджемов С.С., Климов Н.В., Терешонок М.В., Чиров М.В. Использование искусственных нейронных сетей для классификации источников сигнала в системах когнитивного радио / Программирование, 2016. №3. С.3-11.
7. Комашинский В.И., Смирнов Д.А. Нейронные сети и их применение в системах управления и связи. М., 2002.

## РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

8. Zeng G., Hush D., Ahmed N. An application of neural net in decoding error-correcting codes // IEEE International Symposium on Circuits and Systems. 1989. Vol. 1. P. 782-785.
9. Хайкин С. Нейронные сети: 2-е изд. М.: Вильямс, 2006. 1104 с.
10. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений. Изд. 2-е, переработанное. М.: Советское радио, 1970. 728 с.
11. Морозов Н.С. Исследование дисперсионных свойств рекурсивных цифровых фильтров // Проектирование и технологии электронных средств, 2020. №1. С.21-24.
12. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей. Пер. с англ. М.: Вильямс, 2001. 288с.
13. Кларк Дж., мл., Кейн Дж. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи. Пер с англ. М.: Радио и связь, 1987. 392 с.
14. Шамсимухаметов Д., Андреев К., Фролов А. Исследование методов декодирования на основе глубоких нейронных сетей. Сборник трудов 42-й междисциплинарной школы-конференции ИППИ РАН «Информационные технологии и системы», 2018. С.208-218.
15. Балашов В.А., Воробийченко П.П., Ляховецкий Л.М. Системы передачи ортогональными гармоническими сигналами. М.: Эко-трендз, 2012. 228 с.
16. Блох Э.Л., Зяблов В.В. Обобщенные каскадные коды. М.: Связь, 1976. 240 с.
17. Блох Э.Л., Зяблов В.В. Линейные каскадные коды. М.: Наука, 1982. 230 с.
18. Зюко А.Г., Кловский Д.Д., Коржик В.И., Назаров М.В. Теория электрической связи. М.: Радио и связь, 1998. 433 с.

УДК 621.396

## ОБЛАСТЬ ПРИМЕНИМОСТИ ПРИБЛИЖЕННОЙ ФОРМУЛЫ ДЛЯ ДОПУСТИМОГО ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/ПОМЕХА ПРИ РАСЧЕТЕ НАДЕЖНОСТИ КОРОТКОВОЛНОВОЙ СВЯЗИ С РАЙСОВСКИМИ ЗАМИРАНИЯМИ\*

## SCOPE OF APPLICABILITY OF THE APPROXIMATE FORMULA FOR THE PERMISSIBLE SIGNAL- TO-INTERFERENCE RATIO WHEN CALCULATING THE RELIABILITY OF SHORT-WAVE COMMUNICATIONS WITH RICIAN FADING

**Владимир Петрович Пашинцев**

*заслуженный работник высшей школы РФ  
почетный радист РФ*

*доктор технических наук, профессор  
профессор кафедры*

*«Информационная безопасность  
автоматизированных систем»*

*Северо-Кавказский федеральный университет*

*Адрес: 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1*

*E-mail: pasintsevp@mail.ru*

**Дмитрий Александрович Белоконь**

*аспирант кафедры*

*«Информационная безопасность  
автоматизированных систем»*

*Северо-Кавказский федеральный университет*

*Адрес: 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1*

*E-mail: ahoi8@yandex.ru*

**Игорь Анатольевич Бойченко**

*кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник  
ведущий научный сотрудник*

*АО «ЦНИИмаш»*

*Адрес: 141070, Московская обл., г. Королёв,*

*ул. Пионерская, д.4*

*E-mail: edembuss@mail.ru*

**Евгений Михайлович Гринев**

*аспирант кафедры*

*«Информационная безопасность  
автоматизированных систем»*

*Северо-Кавказский федеральный университет*

*Адрес: 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1*

*E-mail: saru3d@yandex.ru*

### Аннотация

Разработана методика оценки надежности связи в однолучевой КВ радиолинии с райсовскими замираниями, которая позволяет получить аналитическую зависимость надежности (вероятности) связи от рабочей частоты, уровня диффузности ионосферы и допустимой вероятности ошибки. Определена область применимости приближенной формулы для допустимого отношения сигнал/помеха при расчете надежности связи в однолучевой КВ радиолинии с райсовскими замираниями. Показано, что в условиях слабой диффузности ионосферы в диапазоне отношений рабочей частоты к максимально применимой от 1 до 0,75 применение приближенной аналитической формулы обеспечивает получение одинаковых значений надежности связи с результатами ее расчетов численными методами.

**Ключевые слова:** однолучевая коротковолновая радиолиния, ионосфера, диффузность, райсовские замирания, допустимое отношение сигнал/помеха, надежность связи.

### Summary

A method has been developed for assessing the reliability of communication in a single-beam HF radio line with Rice fading, which allows us to obtain an analytical dependence of the reliability (probability) of communication on the operating frequency, the level of ionospheric diffusivity and the permissible probability of error. The scope of applicability of the approximate formula for the permissible signal-to-noise ratio when calculating the reliability of communication in a single-beam HF radio line with Rice fading is determined. It is shown that under conditions of weak ionospheric diffusivity in the range of the ratio of the operating frequency to the maximum applicable from 1 to 0.75, the use of an approximate analytical formula provides the same values of reliability of communication with the results of its calculations by numerical methods.

**Keywords:** single-beam short-wave radio line, ionosphere, diffusivity, fading, rice fading, acceptable signal/interference ratio, communication reliability.

### Введение

Известна [1] методика оценки зависимости надежности связи в коротковолновой (КВ)

радиолинии с одним дискретным лучом и диффузным рассеянием волны на мелкомасштабных неоднородностях ионосферы от выбора рабо-

\* Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках выполнения проекта № 22-21-00768 (<https://rscf.ru/project/22-21-00768>).

чей частоты с учетом сигнально-помеховой обстановки и уровня диффузности ионосферы. В данной методике для описания замираний принимаемого сигнала, вызванных диффузностью ионосферы, используется  $m$ -распределение Накагами. Это распределение удобно тем, что оно обеспечивает возможность получения аналитических выражений для допустимого отношения сигнал/помеха на входе приемника и последующей оценки надежности связи.

Однако согласно экспериментальным данным в КВ однолучевой радиолинии замирания амплитуды сигнала в 90% всех случаев описываются распределением не Накагами, а Райса [2-4].

Если для описания замираний принимаемого сигнала, вызванных диффузностью ионосферы, используется распределение Райса, то сложность выражения для вероятности ошибочного приема сигналов с райсовскими замираниями не позволяет получить аналитическое выражение для допустимого отношения сигнал/помеха. Это обуславливает возможность получения оценок надежности КВ связи только численными методами [5]. Однако численные методы имеют ряд существенных недостатков: они не универсальны, связаны с трудоемкими вычислениями и требуют обработки значительного массива исходных данных.

С другой стороны, известно [6] упрощенное (приближенное) выражение для вероятности ошибочного приема сигналов с райсовскими замираниями, которое дает возможность получить аналитическое выражение для допустимого отношения сигнал/помеха и оценки надежности связи.

Целью статьи является оценка области применимости приближенной формулы для допустимого отношения сигнал/помеха при расчете надежности связи в однолучевой коротковолновой радиолинии с райсовскими замираниями в зависимости от выбора рабочей частоты и уровня диффузности ионосферы.

### Сравнительный анализ точного и приближенного аналитического выражения для допустимого отношения сигнал/помеха при некогерентном приеме сигналов с райсовскими замираниями

Известно [6], что надежность (вероятность) связи в КВ радиолинии определяется как вероятность ( $P$ ) того, что величина вероятности ошибки ( $P_{\text{ош}}$ ) при приеме сигналов будет не хуже допустимого значения ( $P_{\text{ош доп}}$ )

$$D_{\text{св}} = P(P_{\text{ош}} \leq P_{\text{ош доп}}) = F((\bar{Z} - Z_{\text{доп}}) / \sigma_Z) = F(\Delta Z / \sigma_Z) = F(\xi), \quad (1)$$

где  $F(\xi) = (\sqrt{2\pi})^{-1} \int_{-\infty}^{\xi} \exp(-0,5t^2) dt$  – функция Лапласа;

$\xi = (\bar{Z} - Z_{\text{доп}}) / \sigma_Z = \Delta Z / \sigma_Z$ ;  $\bar{Z}$  – среднее (медианное) отношение (превышение) сигнал/помеха (С/П), выраженное в децибелах (дБ), на входе приемника (ПРМ) в условиях замираний, равное отношению С/П при отсутствии замираний

$$(Z = \bar{Z})$$

$$\sigma_{\varphi}^2(f_0, \beta_{\text{и}}) = \sqrt{\pi} r_0 L_3 (\pi f_0 \beta_{\text{и}} / c K_S^2 \sec^2 \varphi_0)^2, \text{ рад}^2;$$

$Z_{\text{доп}}$  – допустимое превышение С/П на входе ПРМ, определяемое по функциональной зависимости  $P_{\text{ош}} = P_{\text{ош}}(Z = \bar{Z})$  при допустимом значении вероятности ошибки  $P_{\text{ош}} = P_{\text{ош доп}}$  в условиях замираний принимаемых сигналов, дБ;

$\sigma_Z$  – среднеквадратическое отклонение (СКО) превышения С/П из-за медленных замираний сигналов и помех (которое не зависит от рабочей частоты и в среднем за месяц составляет  $\sigma_Z = 14$  дБ [3,7]).

Существующая методика оценки надежности в однолучевой КВ радиолинии [5] с райсовскими замираниями включает четыре этапа для определения зависимостей:

1) параметра замираний с распределением Райса  $\gamma^2(f_0, \beta_{\text{и}})$  от рабочей частоты ( $f_0$ ) и уровня диффузности ( $\beta_{\text{и}}$ ) ионосферы (т.е. относительного значения СКО флуктуаций электронной концентрации в мелкомасштабных неоднородностях ионосферы);

2) допустимого отношения С/П на входе ПРМ от рабочей частоты  $f_0$ , уровня диффузности ионосферы  $\beta_{\text{и}}$ , вызывающего замирания с распределением Райса  $\gamma^2(f_0, \beta_{\text{и}})$ , и допустимой вероятности ошибки  $P_{\text{ош доп}}$ :

$$Z_{\text{доп}} = Z_{\text{доп}}(\gamma^2, P_{\text{ош доп}}) = Z_{\text{доп}}(f_0, \beta_{\text{и}}, P_{\text{ош доп}}); \quad (2)$$

3) среднего отношения С/П от выбора рабочей частоты  $\bar{Z} = \bar{Z}(f_0)$ ;

4) надежности связи в КВ радиолинии от выбора рабочей частоты  $f_0$  с учетом возможного изменения разности

$$\Delta Z(f_0, \beta_{\text{и}}) = \bar{Z}(f_0) - Z_{\text{доп}}(f_0, \beta_{\text{и}}, P_{\text{ош доп}})$$

среднего и допустимого отношения С/П на входе ПРМ из-за изменения сигнально-помеховой обстановки, характеризуемой  $\bar{Z}(f_0)$ , и уровня диффузности ионосферы  $\beta_{\text{и}}$ , определяющей  $Z_{\text{доп}}(f_0, \beta_{\text{и}}, P_{\text{ош доп}})$ :

$$D_{\text{св}} = F\left(\frac{\bar{Z}(f_0) - Z_{\text{доп}}(\gamma^2, P_{\text{ош доп}})}{\sigma_Z}\right) = F\left(\frac{\bar{Z}(f_0) - Z_{\text{доп}}(f_0, \beta_{\text{и}}, P_{\text{ош доп}})}{\sigma_Z}\right). \quad (3)$$

Недостатком данной методики является то, что определение зависимости (2)  $Z_{\text{доп}} = Z_{\text{доп}}(\gamma^2, P_{\text{ош доп}})$  осуществляется на основе достаточно сложной формулы для вероятности ошибки при оптимальном некогерентном приеме ортогональных сигналов с райсовскими замираниями [3,7]:

$$P_{\text{ош}} = \frac{\gamma^2 + 1}{h^2 + 2(\gamma^2 + 1)} \exp\left(-\frac{\gamma^2 h^2}{h^2 + 2(\gamma^2 + 1)}\right), \quad (4)$$

где  $\gamma^2$  – параметр распределения Райса ( $0 \leq \gamma^2 \leq \infty$ );

$h^2$  – отношение сигнал/помеха (С/П) на входе приемника.

Из выражения (4) невозможно получить аналитическое выражение для определения зависимости допустимого превышения С/П  $Z_{\text{доп}} = 10 \lg h^2_{\text{доп}}$  от допустимой вероятности ошибки  $P_{\text{ош доп}}$  и параметра Райса  $\gamma^2$ . Поэтому в [5] величина  $Z_{\text{доп}}$  определяется из выражения (4)  $P_{\text{ош}}(h^2, \gamma^2)$  с помощью численных методов, встроенных в пакет прикладных программ MATLAB [8-10].

С другой стороны, известно [6], что для определения вероятности ошибки при оптимальном некогерентном приеме ортогональных сигналов с райсовскими замираниями существует упрощенная аналитическая формула

$$P_{\text{ош}} \approx \frac{(1 + \gamma^2)}{h^2} \exp(-\gamma^2), \quad (5)$$

которая справедлива при условии  $h^2 \gg 1 + \gamma^2$ , т.е. когда отношение С/П на входе ПРМ намного превышает параметр Райса. Следует отметить, что в КВ системах связи реализуемое отношение С/Ш на входе ПРМ составляет  $h^2 = 10 \cdot 10^4$  и обычно принимается допущение о релейском характере замираний (когда  $\gamma^2 = 0$ ) принимаемых сигналов в однолучевой радиолнии [7, 11]. Поэтому условие  $h^2 \gg 1 + \gamma^2$  применимости приближенной зависимости (5) для анализа помехоустойчивости КВ систем связи обычно выполняется.

Из выражения (5) легко выразить зависимость параметра допустимого превышения С/П  $Z_{\text{доп}} = 10 \lg h^2_{\text{доп}}$  от допустимой вероятности ошибки  $P_{\text{ош доп}}$  и параметра Райса  $\gamma^2$  в виде приближенной формулы

$$Z_{\text{доп}} \approx 10 \lg \left( \frac{(1 + \gamma^2)}{P_{\text{ош доп}}} \exp(-\gamma^2) \right). \quad (6)$$

Таким образом, вместо определения в [5] зависимости  $Z_{\text{доп}} = Z_{\text{доп}}(\gamma^2, P_{\text{ош доп}})$  на основе формулы (4) с помощью численных методов можно воспользоваться приближенной аналитической зависимостью (6).

Поэтому предлагаемая методика оценки надежности в однолучевой КВ радиолнии с райсовскими замираниями включает, как и известная [5] методика, четыре этапа и отличается лишь этапом №2: заменой зависимости (2) на приближенную аналитическую зависимость (6):

$$Z_{\text{доп}} \approx Z_{\text{доп}}(\gamma^2, P_{\text{ош доп}}) = Z_{\text{доп}}(f_0, \beta_{\text{и}}, P_{\text{ош доп}}). \quad (7)$$

В этой связи представляется необходимым найти области применимости приближенной формулы (6) для определения зависимости (7) допустимого отношения С/П на входе ПРМ от рабочей частоты  $f_0$ , уровня диффузности ионосферы  $\beta_{\text{и}}$ , вызывающего замирания с распределением Райса  $\gamma^2(f_0, \beta_{\text{и}})$ , и допустимой вероятности ошибки  $P_{\text{ош доп}}$ . Это позволит на 3 и 4 этапах методики произвести аналитический расчет зависимости  $D_{\text{св}} = D_{\text{св}}(f_0, \beta_{\text{и}}, P_{\text{ош доп}})$  надежности связи в однолучевой КВ радиолнии от выбора рабочей частоты с учетом сигнально-помеховой обстановки и уровня диффузности ионосферы согласно (3).

В соответствии с этапом №1 методики [5] параметр Райса в однолучевой КВ радиолнии зависит от выбора рабочей частоты  $f_0$  и уровня диффузности ионосферы  $\beta_{\text{и}}$  через величину дисперсии флуктуаций фазы отраженной волны  $\sigma_{\varphi}^2$  на выходе неоднородной ионосферы как

$$\gamma^2(f_0, \beta_{\text{и}}) = \left( \exp(\sigma_{\varphi}^2(f_0, \beta_{\text{и}})) - 1 \right)^{-1}, \quad (8)$$

где

$$\sigma_{\varphi}^2(f_0, \beta_{\text{и}}) = \sqrt{\pi} r_0 L_{\text{э}} (\pi f_0 \beta_{\text{и}} / c K_s^2 \sec^2 \varphi_0)^2, \text{ рад}^2 \quad (9)$$

Здесь  $r_0$  – характерный (средний) размер мелкомасштабных ионосферных неоднородностей (200-500 м);

$L_{\text{э}}$  – эквивалентный однородный путь волны в слое F2 ионосферы (зависящий от его критической частоты  $f_{\text{к2}}$ , высоты нижней границы  $h_0$  и максимума ионизации  $h_m$ , дальности радиосвязи  $d$ );

$c$  – скорость света;

$K_s$  – поправочный коэффициент на сферичность Земли и ионосферы;

$\varphi_0$  – угол падения волны на нижнюю границу  $h_0$  отражающего слоя F ионосферы.

В качестве примера расчета воспользуемся исходными данными, приведенными [5] для дневной среднеширотной ионосферы:  $f_{\text{к2}} = 4,92$  МГц,  $h_m = 302,4$  км,  $d = 2000$  км,  $K_s \approx 1$ .

В соответствии с этими исходными данными значение максимально применимой частоты (МПЧ) в КВ радиолнии составляет  $f_M = 11,9$  МГц [5].

На рисунке 1 представлены графики приближенной зависимости допустимого превышения С/П (7)  $Z_{\text{доп}} = Z_{\text{доп}}(\gamma^2, P_{\text{ош доп}})$  при  $P_{\text{ош доп}} = 3 \cdot 10^{-4}$  от выбора рабочей частоты рабочей ( $f_0$ ) и ее отношения к МПЧ ( $f_0/f_M$ ) в однолучевой КВ радиолнии с райсовскими замираниями при различной диффузности ионосферы: слабой  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$  (кривая 1) и сильной  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$  (кривая 2), построенные с помощью приближенной формулы (6), где параметр Райса  $\gamma^2 = \gamma^2(f_0, \beta_{\text{и}})$  рассчитан в соответствии с выражениями (8) и (9). Выбран-

ное значение допустимой вероятности ошибки  $P_{\text{ош доп}} = 3 \cdot 10^{-4}$  соответствует современным тенденциям развития систем и сетей КВ радиосвязи [14,15].

На этом же *рисунке 1* представлены известные [5] графики зависимости допустимого превышения С/П на входе приемника  $Z_{\text{доп}}(f_0, \gamma^2, P_{\text{ош доп}})$  при  $P_{\text{ош доп}} = 3 \cdot 10^{-4}$  от выбора рабочей частоты ( $f_0$ ) и ее отношения к МПЧ ( $f_0/f_M$ ) в однолучевой КВ радиолинии с райсовскими замираниями при различной диффузности ионосферы: слабой  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$  (кривая 3) и сильной  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$  (кривая 4, которая совпадает с кривой 2).

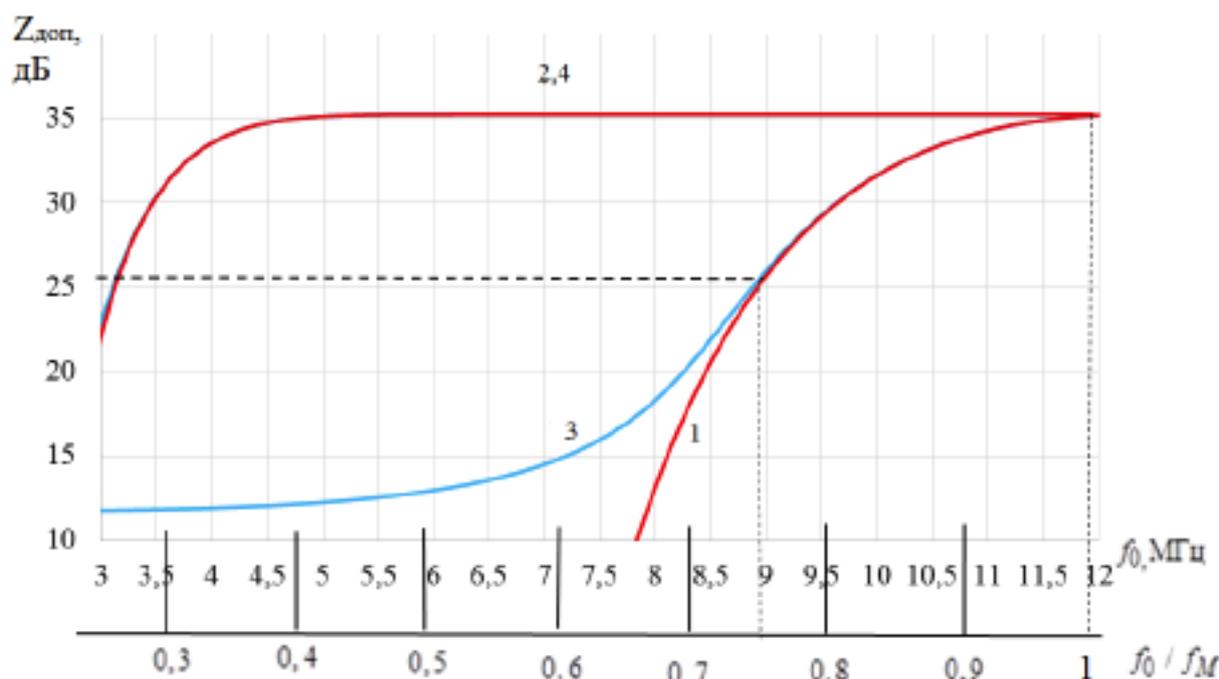
Анализ графиков, представленных на *рисунке 1* показывает, что при слабой диффузности  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$  значения  $Z_{\text{доп}}$  (см. кривую 1), полученные по приближенной аналитической формуле (6), могут сильно отличаться от значений  $Z_{\text{доп}}(f_0)$  (кривая 3), полученных в [5] численным методом с помощью известного выражения (4). Однако в диапазоне рабочих частот от  $f_0 \approx 9$  МГц до максимально применимой частоты (МПЧ)  $f_M = 11,9$  МГц (т.е. в диапазоне отношений  $f_0/f_M \geq 0,75$ ) значения допустимых отношений С/П, полученных с помощью выражений (4) и (6), практически совпадают:  $Z_{\text{доп}} \approx 25..35$  дБ. При сильной диффузности ионосферы  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$  (кривые 2 и 4) при отношении рабочей частоты к МПЧ  $f_0/f_M \geq 0,4$  допустимые отношения С/П, полученные с помощью выражений (4) и (6), совпадают и составляют  $Z_{\text{доп}} \approx 35$  дБ.

### Зависимость области применимости приближенной формулы для допустимого отношения сигнал/помеха при расчете надежности связи в КВ радиолинии с райсовскими замираниями от рабочей частоты и уровня диффузности ионосферы

На *рисунке 2* представлены известные [1] графики зависимости  $\bar{Z}(f_0)$  среднего отношения С/П от выбора рабочей частоты, построенные для условий дневной среднеширотной ионосферы при тех же исходных данных, что использовались при построении зависимостей  $Z_{\text{доп}}(f_0, \beta_{\text{и}}, P_{\text{ош доп}})$  на *рисунке 1*.

На основе приведенных на *рисунках 1* и *2* графиками  $Z_{\text{доп}}(f_0, \beta_{\text{и}}, P_{\text{ош доп}})$  и  $\bar{Z}(f_0)$  в соответствии с выражением (3) можно построить графики зависимости  $D_{\text{св}}(f_0, \beta_{\text{и}}, P_{\text{ош доп}})$  надежности связи в однолучевой КВ радиолинии от выбора рабочей частоты при заданном уровне диффузности ( $\beta_{\text{и}}$ ) и допустимой вероятности ошибки  $P_{\text{ош доп}}$ .

На *рисунке 3* представлены графики зависимости  $D_{\text{св}}(f_0)$  надежности связи при  $P_{\text{ош доп}} = 3 \cdot 10^{-4}$  в однолучевой КВ радиолинии с райсовскими замираниями от выбора рабочей частоты ( $f_0$ ) и ее отношения к МПЧ ( $f_0/f_M$ ) при различном уровне диффузности ионосферы: слабой  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$  (кривая 1) и сильной  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$  (кривая 2), рассчитанные с помощью приближенной аналитической формулы (6) с учетом выражений (8,9). На этом же *рисунке 3* представлены известные [5] графики зависимости  $D_{\text{св}}(f_0)$  надежности связи при



**Рис. 1.** Зависимости допустимого превышения сигнал/помеха от частоты, полученные по приближенной формуле (6) при слабой  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$  (кривая 1) и сильной  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$  (кривая 2) диффузности, и с помощью выражения (4) при слабой  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$  (кривая 3) и сильной  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$  (кривая 4) диффузности

## РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

$P_{\text{ош доп}} = 3 \cdot 10^{-4}$  в однолучевой КВ радиолинии с райсовскими замираниями от выбора рабочей частоты при различном уровне диффузности ионосферы: слабой  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$  (кривая 3) и сильной  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$  (кривая 4).

Сравнительный анализ кривых 1 и 3, а также 2 и 4 позволяет установить зависимость область применимости приближенной формулы для допустимого отношения сигнал/помеха (6) с учетом (8, 9) при расчете надежности связи в однолучевой КВ радиолинии с райсовскими замираниями от выбора рабочей частоты  $f_0$  и уровня диффузности ионосферы  $\beta_{\text{и}}$ .

Анализ кривых на рисунке 3 показывает, что при сильной диффузности ионосферы  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$  (кривые 2 и 4) значения  $D_{\text{св}}$ , полученные с помощью выражений (6) и (4), будут полностью совпадать во всем диапазоне рабочих частот  $f_0/f_M \leq 1$ . При слабой диффузности ионосферы  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$  (кривые 1 и 3) в диапазоне отношений рабочих частот к МПЧ  $f_0/f_M \geq 0,75$  значения надежности связи, полученные с помощью выражений (6) и (4), будут совпадать:  $D_{\text{св}} \approx 0,9..0,78$ . В диапазоне  $f_0/f_M < 0,75$  рассчитанные с помощью приближенной формулы (6) значения надежности связи (кривая 1) могут быть существенно за-

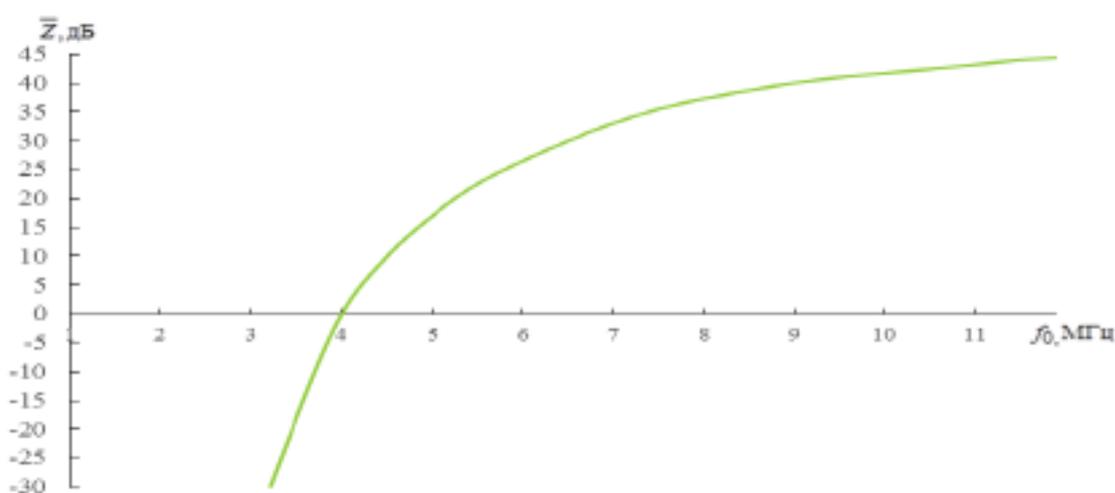


Рис. 2. Зависимость среднего отношения сигнал/помеха от выбора рабочей частоты

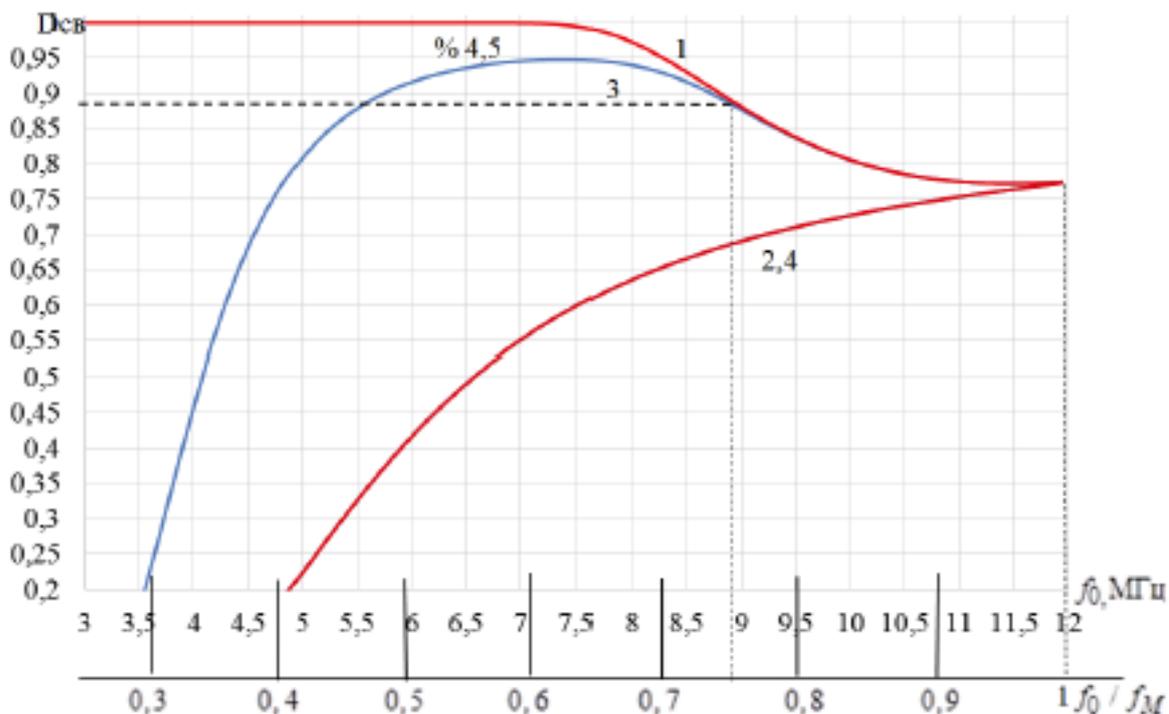


Рис. 3. Зависимости надежности связи от рабочей частоты, полученные с помощью приближенной формулы (6) при слабой  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$  (кривая 1) и сильной  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$  (кривая 2) диффузности, и с помощью выражения (4) при слабой  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$  (кривая 3) и сильной  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$  (кривая 4) диффузности

вышены по сравнению со значениями (кривая 3), рассчитанными на основе выражения (4) по известной методике [5].

### Заключение

Разработана методика оценки надежности в однолучевой КВ радиолинии с райсовскими замираниями, которая отличается от известной [5] применением приближенной аналитической формулы (6) для определения зависимости  $Z_{\text{доп}}(f_0, \beta_{\text{и}}, P_{\text{ош доп}})$  допустимого отношения сигнал/помеха на входе приемника от рабочей частоты, уровня диффузности ионосферы и допустимой вероятности ошибки (рисунк 1).

Это позволяет получить аналитические зависимости  $D_{\text{св}}(f_0, \beta_{\text{и}}, P_{\text{ош доп}})$  надежности связи в однолучевой КВ радиолинии от выбора рабочей частоты  $f_0$  и уровня диффузности ионосферы  $\beta_{\text{и}}$  с учетом возможного изменения сигнально-помеховой обстановки  $\bar{Z}(f_0)$  (кривые 1 и 2 на рисунке 3).

Сравнение кривых 1 и 2 на рисунке 3 с известными зависимостями  $D_{\text{св}}(f_0, \beta_{\text{и}}, P_{\text{ош доп}})$ , полученными на основе выражения (4) численными методами (кривые 3 и 4 на рисунке 3), позволяет установить область применимости приближенной формулы для допустимого отношения сигнал/помеха при расчете надежности связи в однолучевой КВ радиолинии с райсовскими замираниями, границы которой зависят от рабочей частоты  $f_0$  и уровня диффузности ионосферы  $\beta_{\text{и}}$  следующим образом:

- в условиях сильной диффузности ( $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$ ) ионосферы (кривая 2) во всем диапазоне отношений рабочей частоты к МПЧ ( $f_0/f_M \leq 1$ ) применение приближенной аналитической формулы (6) обеспечивает получение одинаковых значений надежности связи  $D_{\text{св}}$  с результатами ее расчетов численными методами на основе выражения (4);

- в условиях слабой диффузности ( $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$ ) ионосферы (кривая 1) в диапазоне отношений рабочей частоты к МПЧ ( $0,75 \leq f_0/f_M \leq 1$ ) применение приближенной аналитической формулы (6) обеспечивает получение одинаковых значений надежности связи  $D_{\text{св}}$  с результатами ее расчетов численными методами, а в диапазоне частот  $f_0/f_M < 0,75$  результаты расчета  $D_{\text{св}}$  могут быть сильно завышены по сравнению с расчетами численными методами на основе выражения (4).

### Литература

1. Пашинцев В.П., Скорик А.Д., Коваль С.А., Киселев Д.П., Сенокосов М.А. Зависимость надежности связи в декаметровый радиолинии от выбора рабочей частоты с учетом сигнально-по-

меховой обстановки и диффузности ионосферы // Системы управления, связи и безопасности, 2019. №4. С.300-322.

2. Кирилов Н.Е. Помехоустойчивая передача сообщений по линейным каналам со случайно изменяющимися параметрами. М.: Сов. радио, 1971. 256 с.

3. Кловский Д.Д. Передача дискретных сообщений по радиоканалам. М.: Связь, 1969. 376 с.

4. Фабрицио Джузеппе А. Высокочастотный загоризонтный радар: основополагающие принципы, обработка сигналов и практическое применение / пер. с англ. Н.Л. Бирюкова, Е.Б. Махиянова, К.В. Юдинцева. М: Техносфера, 2018. 936 с.

5. Пашинцев В.П., Белоконь Д.А., Коваль С.А., Скорик А.Д. Методика оценки надежности связи в коротковолновой радиолинии с райсовскими замираниями с учетом диффузности ионосферы // Известия вузов России. Радиоэлектроника, 2022. Т.25. № 6. С.300-322.

6. Андронов И.С., Финк Л.М. Передача дискретных сообщений по параллельным каналам. М.: Советское радио, 1971, 408 с.

7. Комарович В.Ф., Сосунов В.Н. Случайные помехи и надежность КВ связи. М.: Связь, 1977. 136 с.

8. Чернусь П.П., Чернусь П.П. Численные методы и их применение в MATLAB. СПб.: БГТУ, 2018. 90 с.

9. Гринев А.Ю., Ильин Е.В. Основы электродинамики с MATLAB. М.: Логос, 2013. 176 с.

10. Luis F. Chaparro signals and systems using MATLAB; Elsevier - Москва, 2011. 768 с.

11. Черенкова Л.Е., Чернышов О.В. Распространение радиоволн. М.: Радио и связь, 1984. 272 с.

12. International reference ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions / D. D. Bilitza, V. Altadill, V. Truhlik, I. Shubin, B. Galkin, X. Huang // Space Weather. 2017. Vol. 15. P.418-429.

13. International reference ionosphere – IRI (2016). URL: [https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/iri2016\\_vitmo.php](https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/iri2016_vitmo.php) (дата обращения: 20.08.2023).

14. Березовский В.А., Дулькейт И.В., Савицкий О.К. Современная декаметровая радиосвязь: оборудование, системы и комплексы / Под ред. В.А. Березовского. М.: Радиотехника, 2011. 444 с.

15. Давыдов А.Е., Давыдов Б.М., Виноградов В.М. Повышение скорости и достоверности передачи информации в распределенных автоматизированных системах, использующих каналы пониженного качества // Вопросы радиоэлектроники, 2012. Т.3. №3. С.69-84.

УДК 004.056

## АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К ВОПРОСУ ЗАЩИТЫ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ СРЕДСТВАМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ ИНФОРМАЦИИ ОТ УТЕЧКИ ПО ТЕХНИЧЕСКИМ КАНАЛАМ ANALYSIS OF EXISTING APPROACHES TO THE QUESTION OF PROTECTION OF INFORMATION PROCESSED BY COMPUTER TECHNOLOGY FROM LEAKAGE THROUGH TECHNICAL CHANNELS



**Сергей Викторович Рыженко**  
кандидат технических наук  
директор департамента  
ООО «Центр безопасности информации»  
Адрес: 141090, Московская обл., г. Королев,  
микрорайон Юбилейный, ул. Ленинская, д. 11  
Тел.: (495) 580-52-18  
E-mail: svr@cbi-info.ru

### Аннотация

В статье проведен комплексный обзор существующих подходов по обеспечению защищенности обрабатываемой информации от утечки за счет побочных электромагнитных излучений, описаны основные преимущества и недостатки описанных методов и предложен критерий оценки оптимальности выбора средств защиты информации.

**Ключевые слова:** средство вычислительной техники, объект информатизации, пассивная защита, активная защита, электромагнитное излучение, генератор шума.

### Summary

In the article it was carried out the complex overview of existing approaches to ensuring the protection of the information being processed from leakage due to side electromagnetic radiation, also there were described the main advantages and disadvantages of described methods and was proposed the criterion for assessing the optimal choice of information protection tools.

**Keywords:** computer technology, information object, passive protection, active protection, electromagnetic radiation, noise generator.

На объектах информатизации при осуществлении обработки защищаемой информации средствами вычислительной техники актуальной становится задача обеспечения защищенности информации от утечки по техническим каналам [1].

Традиционно решение задач защиты информации от утечки по техническим каналам при использовании средств вычислительной техники сводится к применению защищенного (сертифицированного) оборудования [2,3] или средств активной защиты информации, маскирующих информативные сигналы.

Скрытие побочных электромагнитных излучений на различных стадиях и этапах жизненного цикла объекта информатизации может быть обеспечено путём проведения организационных мероприятий или применением пассивных и активных мер и средств защиты (технических мер).

Организационные мероприятия основаны на создании пространственных и временных ограничений доступа физических лиц к объектам ин-

форматизации и режимам его работы, на выборе соответствующих зданий, помещений, условий размещений и типов защищаемых технических средств на объектах информатизации. Организационные мероприятия не требуют применения специально разработанных технических средств.

Защита информации техническими мерами решается в двух принципиально отличных, но взаимно дополняющих направлениях:

- пассивная защита информации от утечки по техническим каналам за счет электромагнитных излучений основана на применении экранирующих и поглощающих свойств материалов и покрытий на самих объектах информатизации и в помещениях, где они размещаются (рисунком 1), а также на использовании специальных строительных и/или конструктивных элементов, снижающих уровни излучения (доработка помещений и средств вычислительной техники, подбор комплектующих, включая кабели, исключение дефектов в средствах вычислительной техники (перепайка разъёмов, стыков, заделывание швов, щелей и т.п.)) [4];

- активная защита информации от утечки по техническим каналам за счет применения способов активного зашумления (формирование маскирующего шума, создаваемого генераторами шума (рисунком 2)).

### 1. Пассивная защита информации

Пассивные меры защиты информации позволяют существенно снизить уровень сигналов побочных электромагнитных излучений, однако полностью устранить их, как показала практика создания средств вычислительной техники в защищённом исполнении, нельзя. Принципиальная сложность проектирования и разработки защищенных СВТ связана с ограниченным составом отечественных платформ и комплектующих, а также нестабильностью наличия на рынке компонентов СВТ иностранного производства ввиду их модернизации и замены на более перспективные и новые образцы, что в конечном счёте приводит к высокой стоимости средств вычислительной техники с низким уровнем побочных электромагнитных излучений.

К основным преимуществам применения пассивных мер защиты относятся:

- отсутствие дополнительных электромагнитных шумов;
- высокая временная надёжность и стабильность параметров мер защиты;
- скрытность примененных мер защиты;
- круглосуточная защищённость объекта защиты;
- энергонезависимость мер защиты и, как следствие, низкая стоимость эксплуатации.

Среди недостатков пассивных мер защиты информации от утечки за счёт побочных электромагнитных излучений наиболее значимыми являются:



Рис. 1. Пример защищенного пассивными методами помещения

- применение только пассивных мер защиты не может полностью решить задачу обеспечения защищённости информации от утечки за счёт побочных электромагнитных излучений;

- применение мер пассивной защиты помещений со средствами вычислительной техники возможно только на этапе строительства или капитального ремонта защищаемого объекта;

- изменение параметров защищённости помещения, таких как повышение уровня экранирования ограждающих конструкций (экранировка) со средствами вычислительной техники, как правило, связано со строительными работами;

- оценка эффективности доработки пассивными мерами защиты средств вычислительной техники допускается только в лабораторных условиях в экранированных камерах или на измерительной площадке;

- высокая стоимость реализации.

Частично проблему высокой стоимости реализации при пассивных методах защиты информации от утечки по техническим каналам удаётся решать созданием ряда защищённых средств вычислительной техники с фиксированными параметрами защищённости (значениями, не превышающими предельно допустимые уровни).

Однако практика показывает, что без активных методов и средств защиты информации от утечки за счёт побочных электромагнитных излучений стоимость мероприятий по защите информации для большинства типовых объектов информатизации оказывается недопустимо высокой для «Заказчика».

### 2. Активная защита информации

Плюсами систем активного зашумления являются:

- относительно низкая стоимость реализации;



Рис. 2. Пример генератора шума

## РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

- возможность настройки зашумляющих сигналов, обеспечивающих снижение паразитных шумов;

- возможность обеспечения защищённости практически любого средства вычислительной техники;

- простота перевода генераторов шума на иной уровень защищённости.

Активным мерам присущ ряд недостатков:

- наличие в эфире электромагнитных шумов и необходимость контроля их уровня по требованиям Государственной комиссии по радиочастотам и санитарных правил и норм (СанПиН);

- невозможность полного скрытия защитных мер;

- необходимость включения и выключения средств защиты;

- энергозависимость средств защиты;

- необходимость периодической инструментальной оценки эффективности мер защиты.

С учётом преимуществ, недостатков и реализуемости активных и пассивных мер защиты информации от утечки за счёт побочных электромагнитных излучений на современном этапе, несмотря на естественный приоритет пассивных мер, более широко используются меры защиты информации с применением генераторов шума.

Наиболее распространёнными методами, применяемыми для активной защиты информации от утечки за счёт побочных электромагнитных излучений ЗТС, являются методы совмещённого и распределённого размещения генераторов шума (средств активной защиты) [5].

При совмещённом использовании генераторы шума устанавливаются в непосредственной близости относительно средств вычислительной техники и/или входят в его состав в виде РСІ-платы, удлинителя-разветвителя (сетового фильтра) и т.п. Генераторы шума, совмещённые со средствами вычислительной техники, часто называют маскираторами.

Такой подход к применению генераторов шума при всей его очевидной функциональной эффективности имеет существенный недостаток, заключающийся в избыточности средств защиты и, как следствие, дороговизне реализации защиты при значительном количестве средств вычислительной техники.

При распределённом методе размещения генераторов шума относительно средств вычислительной техники на практике применяется два типа средств активной защиты информации:

- точечные (ГШ обладает встроенной антенной или внешней антенной системой, геометрические размеры которых сопоставимы с размерами генератора шума);

- пространственные (средство защиты обладает внешней антенной системой, представляющей из себя, например, рамку, изготовленную из проводника тока, имеющую значительные геометрические размеры).

Пространственные средства активной защиты монтируются, как правило, на этапе капитального ремонта или строительства помещения (здания), в котором планируется размещение средств вычислительной техники, путём монтажа антенных систем генератора шума в ограждающие конструкции помещения (здания). Использование данного типа средств активной защиты информации, зачастую, приводит к избыточности создаваемого электромагнитного шума и редко применимо на практике.

Точечные генераторы шума устанавливаются в произвольных точках пространства и могут обеспечивать защищённость как отдельных средств вычислительной техники, так и их групп (локальных вычислительных сетей). При этом для оценки защищённости информации, обрабатываемой средствами вычислительной техники, допускается учитывать помехи, создаваемые несколькими генераторами шума.

Указанный подход наиболее актуален для распределённых объектов информатизации, включающих в себя группу средств вычислительной техники, используемых для обработки защищаемой информации [5].

В качестве критериев отнесения объекта информатизации к распределённому могут рассматриваться:

- превышение максимального расстояния между местами возможного (планируемого) размещения средств вычислительной техники над расстоянием до ближайшего места возможного размещения средств разведки побочных электромагнитных излучений более, чем на некоторую заданную величину;

- наличие большого количества основных технических средств и систем, линий обмена данными, вспомогательных технических средств и систем, сосредоточенных в одном здании или помещении в пределах контролируемой зоны объекта.

Определение количества основных технических средств и систем, целесообразность рассмотрения которых в виде единого объекта информатизации с применением генераторов шума, можно осуществить, например, по результатам оценивания максимальной экономии ресурсов (например, трудозатрат) среди различных вариантов защиты информации от утечки за счёт побочных электромагнитных излучений, используя технико-экономические показатели специ-

альных работ. Значения технико-экономических показателей могут быть определены путём опроса коммерческих организаций, имеющих лицензии ФСТЭК России на соответствующие виды работ.

В настоящее время традиционным является подход, когда применение генераторов шума идет в привязке каждого генератора шума к конкретным образцам средств вычислительной техники с учётом их взаимного пространственного расположения.

Данный подход имеет ряд недостатков организационного и экономического характера. Во-первых, фиксированная привязка каждого генератора шума к конкретным образцам средств вычислительной техники обуславливает избыточность состава генераторов шума для объекта информатизации, содержащего значительное количество средств вычислительной техники. Во-вторых, необходимость проведения работ по оценке эффективности активной защиты информации для каждого генератора шума и связанных с ним средством вычислительной техники приводит к высокой трудоемкости работ по аттестации объекта информатизации. В-третьих, всякое изменение взаимного расположения средств вычислительной техники и генераторов шума на объекте информатизации требует проведения повторных работ по оценке и обеспечению защищённости информации от утечки за счёт побочных электромагнитных излучений. В-четвёртых, указанный традиционный подход не взаимосвязан с решением задачи выполнения требований Государственного комитета по распределению частот в части предельно допустимых уровней электромагнитных помех, излучаемых совокупностью генераторов шума.

### **3. Предложения по критерию оценки оптимальности выбора средств защиты информации**

На текущий момент времени не определён методический аппарат, позволяющий устранить отмеченные недостатки защиты информации, обрабатываемой на распределённом объекте информатизации, активными методами. Для таких объектов информатизации актуальной становится задача применения оптимизационного подхода к обоснованию требований к характеристикам системы защиты информации распределённого объекта информатизации от утечки по каналам побочных электромагнитных излучений, основанного на введении критерия «эффективность-стоимость» и рассмотрении всех использу-

емых средств защиты информации в виде пространственной системы защиты информации.

Данные подходы рассмотрены автором в ряде других статей [6].

### **Выводы**

Существующие подходы к вопросу защиты обрабатываемой средствами вычислительной техники информации от утечки по техническим каналам при всем многообразии используемых современных материалов и средств защиты информации не учитывают особенностей эксплуатации и системности подхода при проектировании защищённого объекта информатизации. В качестве системного критерия предлагается использовать ранее описанный критерий «эффективность-стоимость».

### **Литература**

1. Кондратьев А.В. Техническая защита информации. Практика работ по оценке основных каналов утечки. М.: 2016. 304 с.
2. Сидак А.А., Василенко В.В., Рыженко С.В., Сидак Д.А. Вопросы применения на объектах критической информационной инфраструктуры инновационных телефонных аппаратов, обеспечивающих защиту чувствительной речевой информации от утечки по техническим каналам // Стратегическая стабильность, 2023. №4. С.51-54.
3. Сидак А.А., Василенко В.В., Рыженко С.В., Сидак Д.А. Вопросы применения на объектах критической информационной инфраструктуры инновационных автоматизированных рабочих мест Интернет, обеспечивающих защиту чувствительной речевой и визуальной информации // Информационные войны. 2023. № 4. С.42-46.
4. Методы защиты информации от утечки через ПЭМИН: [Электронный ресурс] // НОУ ИНТУ-ИТ URL: <https://intuit.ru/studies/courses/4647/591/lecture/12704> (дата обращения: 25.11.2023).
5. Рыженко С.В., Радионов А.В. О способах создания системы защиты информации от утечки за счёт побочных электромагнитных излучений и аттестации объектов вычислительной техники // Сборник научных трудов. Самара, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2017.
6. Василенко В.В., Рыженко С.В. Формализация и математическая постановка задачи построения пространственной системы активной защиты информации от утечки за счёт побочных электромагнитных излучений средств вычислительной техники // Сборник научных трудов. Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2017.

УДК 681.3.07

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ДЕКАМЕТРОВОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С РАЗНЕСЕННЫМ ПРИЕМОМ РАДИОСИГНАЛОВ METHOD OF ESTIMATING NOISE IMMUNITY OF DECAMETER DATA TRANSMISSION SYSTEM WITH SPACED RECEPTION OF RADIO SIGNALS



**Владимир Владимирович Зеленевский**  
почетный работник науки и техники РФ  
почетный радист 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 им. Петра Великого  
Адрес: 143900, Московская обл.,  
г. Балашиха, ул. Карбышева, д.8  
Тел.: +7 (903) 721-12-61  
E-mail: sys1434@mail.ru

**Валерий Владимирович Кургузов**  
преподаватель кафедры  
филиал ВА РВСН им. Петра Великого  
(г. Серпухов)  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17  
Тел.: 8 (915) 181-35-17  
E-mail: valera\_arrow65@mail.ru

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

### Аннотация

В статье представлена методика оценки помехоустойчивости декаметровой системы передачи данных с разнесенным приемом радиосигналов. Установлена степень влияния числа разнесенных антенн в приемной антенной решетке на надежность системы передачи по помехоустойчивости и на вероятность битовой ошибки в условиях воздействия аддитивного белого гауссовского шума и узкополосной гармонической помехи на сигнал с расширенным спектром.

**Ключевые слова:** релейские замирания, помехоустойчивость и надежность радиоканала по помехоустойчивости, пространственный разнесенный прием, медианное отношение сигнал/шум, база сигнала, отношение помеха/сигнал.

### Summary

The article presents a method of estimation the noise immunity of a decameter data transmission system with spaced reception of radio signals. The degree of influence of the number of diversity antennas in receiving antenna array on the reliability of the transmission system in the terms of noise immunity and on the probability of a bit error under the influence of additive white Gaussian noise and narrow band harmonic interference on an extended spectrum signal have been established.

**Keywords:** Rayleigh fading, noise-immunity and reliability of the radio link on noise-immunity, spatial spaced acceptance, median attitude signal/noise, base of the signal, attitude hindrance/signal.

Многолучевой характер распространения сигналов приводит к релейским замираниям в радиолинии и снижению качества приема (увеличивается вероятность битовой ошибки в принятых данных, снижается надежности релейского радиоканала по помехоустойчивости).

Известно [2,3], что качество приема данных можно повысить с помощью разнесенного в пространстве приема сигналов несколькими антеннами или разнесенной передачи, то есть за счет использования приемной или передающей антенной решетки [3].

К методам пространственного кодирования

сигналов в таких системах радиосвязи относятся ортогональное блочное кодирование, которое позволяет разделить символы в приемной антенной решетке с помощью простого линейного преобразования по значению коэффициента взаимной корреляции на выходе корреляционного декодера.

Оценим помехоустойчивость и надежность системы передачи данных, которая использует одну передающую антенну и  $N$  приемных антенн (пространственный разнесенный прием). Структурная схема такой системы представлена на *рисунке 1*.

Для штатной системы радиосвязи характерны коррелированные релейские замирания сигналов одинаковой мощности. При этом отношение сигнал/шум на входе демодулятора  $h_{\Sigma}^2$  имеет экспоненциальную плотность вероятности с медианным параметром  $N_A h_0^2$ :

$$\omega(h_{\Sigma}^2) = \frac{1}{N_A h_0^2} \exp\left(-\frac{h_{\Sigma}^2}{N_A h_0^2}\right). \quad (1)$$

Тогда надежность системы радиосвязи по помехоустойчивости будет определяться выражением

$$P_{\Pi} = \int_y^{\infty} \frac{1}{N_A h_0^2} e^{-\frac{h_{\Sigma}^2}{N_A h_0^2}} dh_{\Sigma}^2, \quad (2)$$

где  $y$  – минимально возможное значение  $h_{\Sigma}^2$ , по которому будем определять вероятность битовой ошибки  $P_b$  на выходе демодулятора (помехоустойчивость).

Медианное отношение сигнал/шум  $h_0^2$  определяется с использованием известной формулы

Казанцева для медианного значения напряженности электрического поля в точке приема  $E_{med}$  [2], действующей высоты (антенны) приемной антенны  $h_{\Sigma}^2$  и параметров канала передачи данных ( $\Delta F_{эфф}$  – эффективная полоса пропускания,  $R_{вх}$  – входное сопротивление приемника):

$$h_0^2 = \frac{(E_{med} \cdot h_0)^2}{4(N_{ш} - 1)kT\Delta FR_{вх}}, \quad (3)$$

где  $N_{ш}$  – коэффициент шума приемника;  
 $k$  – постоянная Больцмана  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{Дж}{\text{°К}}$ ;

$T$  – рабочая температура приемника, °К.

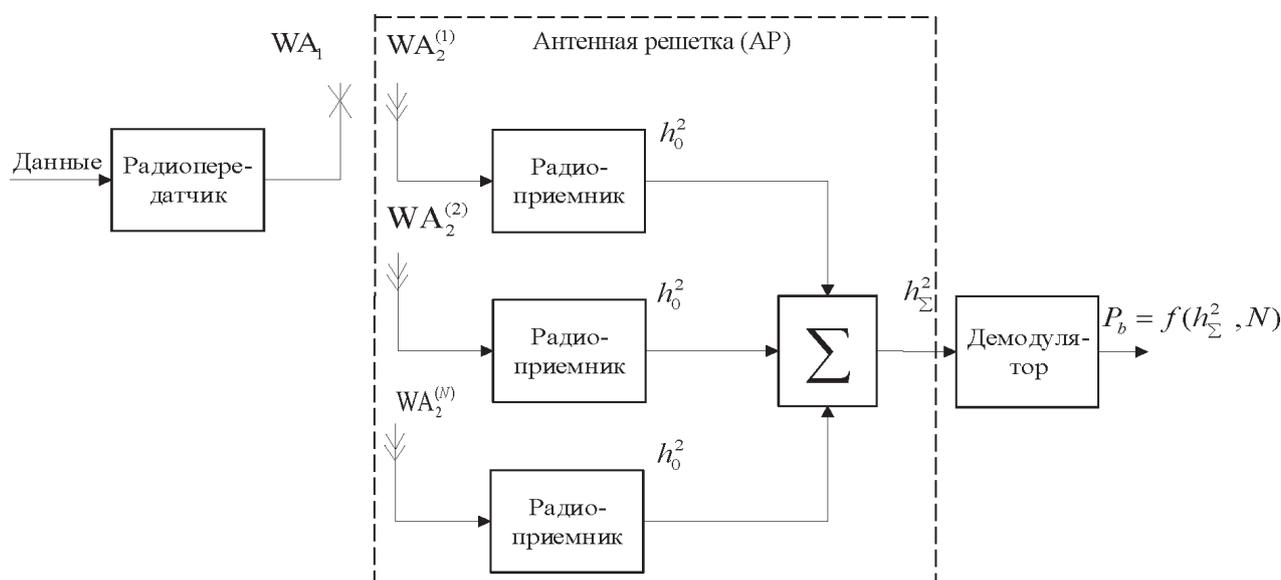
Результаты расчетов вероятностей  $P_{\Pi}$  произведены в *таблице 1*.

Анализ результатов, представленных в *таблице 1*, показывает:

- при постоянных значениях медианного отношения сигнал/шум ( $y \geq 0$ ),  $h_0^2 = const$  с увеличением отношения сигнал/шум  $P_{\Pi}$  уменьшается

**Таблица 1**  
Оценка вероятностей  $P_{\Pi} = f(h_0^2, N)$  при  $y=const$

$y=0$	$N$	$h_0^2=1$	$h_0^2=10$	$h_0^2=100$	$h_0^2=1000$	$h_0^2=10000$
	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	1
	4	1	1	1	1	1
$y=1$	1	0,368	0,905	0,99	0,999	1
	2	0,607	0,951	0,995	1	1
	4	0,779	0,975	0,998	1	1
$y=10$	1	$4,54 \cdot 10^{-5}$	0,368	0,905	0,99	0,999
	2	$6,74 \cdot 10^{-3}$	0,607	0,951	0,995	0,999
	4	0,082	0,779	0,975	0,998	1



**Рис. 1.** Структурная схема системы радиосвязи с разнесенным приемом

(надежность радиоканала снижается);

- с увеличением числа приемных антенн  $N$  при  $y \geq 0$ ,  $h_0^2 = const$  вероятность  $P_u$  увеличивается (надежность радиоканала повышается);

- обеспечить требуемое значение вероятности  $P_u$  можно тремя способами:

- 1) при  $N=const$ ,  $h_0^2 = const$  необходимо уменьшать значение  $y$ ;

- 2) при  $N=const$ ,  $y=const$  необходимо увеличивать медианное значение  $h_0^2$ ;

- 3) при  $y=const$ ,  $h_0^2 = const$  необходимо увеличивать число приемных антенн  $N$ .

В то же время известно [1,2], что помехоустойчивость системы передачи данных (вероятность битовой ошибки  $P_b$ ) зависит от отношения сигнал/шум  $y$  и для сигнала с относительной фазовой манипуляцией определяется выражением:

$$P_b = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} e^{-t^2} dt \cdot \left( \frac{1 + \frac{P_u}{P_c B}}{yN} \right)^{-0.5}, \quad (4)$$

где  $\frac{P_u}{P_c}$  – отношение мощностей узкополосной помехи и полезного сигнала с базой  $B \gg 1$ .

Значение вероятностей  $P_b$  при отсутствии узкополосных помех ( $\frac{P_u}{P_c} = 0$ ) для различных  $y$  и  $N$  представлены в таблице 2.

Сравнение результатов, представленных в таблицах 1 и 2, позволяет установить противоре-

чие по значению  $y$  для выполнения требований по вероятностям  $P_u$  и  $P_b$ .

С одной стороны, для повышения надежности радиоканала передачи  $P_u$  необходимо уменьшать значение  $y$  (при  $h_0^2 = const$ ), а с другой стороны, для уменьшения вероятности  $P_b$  (повышения помехоустойчивости) необходимо увеличивать значение  $y$ .

Для разрешения указанного противоречия введем критерий оптимальности, минимизирующий вероятность битовой ошибки с учетом надежности радиоканала.

$$\min_y P_b = \min_y \left[ \left( 1 - \int_0^{\infty} \frac{1}{yN h_0^2} e^{-h_0^2 (N h_0^2)^{-1}} dh_{\Sigma}^2 \right) \times \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} e^{-t^2} dt \right) \right] \left( \frac{1 + \frac{P_u}{P_c B}}{yN} \right)^{-0.5} \quad (5)$$

В таблице 3 представлены оценки вероятностей  $P_{bn}$  для  $\frac{P_u}{P_c} = 0$ ,  $N=1$  (разнесения нет) и различных  $h_0^2$ .

Анализ результатов расчетов, представленных в таблице 3 показывает:

- существует оптимальное значение  $h_{opt}^2 = y_{opt}$ , при котором значение  $P_{bn}$  минимальное;

- с увеличением медианного отношения сигнал/шум  $h_0^2$  значения  $y_{opt}$  увеличивается, а вероятность  $P_{bn}$  уменьшается (выделено курсивом).

Таким образом, выражение (5), в отличие от известных формул [1,2,3], является более общим, так как позволяет оценить не только вероятность битовой ошибки, но и влияние релейских замираний на помехоустойчивость системы передачи данных при наличии преднамеренных узконаправленных помех  $\frac{P_u}{P_c} > 0$  и возможности расширения спектра сигнала ( $B > 1$ ).

Оценки вероятностей  $P_{bn}$  в системе передачи данных с разнесенным приемом ( $N=2$ ,  $N=4$ ) при

**Таблица 2**

Оценка вероятностей  $P_b = f(y, N)$  при  $\frac{P_u}{P_c} = 0$

$N$	$y=1$	$y=3,02$	$y=10$
1	0,0787	$6,99 \cdot 10^{-3}$	$3,873 \cdot 10^{-6}$
2	0,02276	$2,55 \cdot 10^{-4}$	$1,27 \cdot 10^{-10}$
3	$2,34 \cdot 10^{-3}$	$4,435 \cdot 10^{-7}$	$\sim 0$

**Таблица 3**

Оценка  $P_{bn} = f(y)$  для  $N=1$ ,  $h_0^2 = const$

$h_0^2$	$y$	0,824	1,3677	3,02	<b>4,875</b>	10	50	100
	$h_0^2 = 10^3$	$P_{bn}$	0,1	0,0504	0,01	<b><math>5,76 \cdot 10^{-3}</math></b>	0,01	0,0489
$h_0^2 = 5000$	$y$	0,8166	1,3552	2,7542	<b>6,31</b>	10	50	100
	$P_{bn}$	0,1	0,05012	0,01	<b><math>1,46 \cdot 10^{-3}</math></b>	$2,025 \cdot 10^{-3}$	0,01	0,0198
$h_0^2 = 10^4$	$y$	0,8166	2,73	5,4954	<b>6,9823</b>	10	50	100
	$P_{bn}$	0,1	0,01	0,001	<b><math>7,963 \cdot 10^{-4}</math></b>	0,001	$5 \cdot 10^{-3}$	0,01
$h_0^2 = 25000$	$y$	0,8166	2,704	4,966	<b>7,798</b>	10	25	100
	$P_{bn}$	0,1	0,01	0,001	<b><math>3,51 \cdot 10^{-4}</math></b>	$4,04 \cdot 10^{-4}$	0,001	$4 \cdot 10^{-3}$

## РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

$\frac{P_{II}}{P_C} = 0$  представлены в *таблице 4*.

Анализ результатов, представленных в *таблице 4*, показывает:

- как и для отсутствия разнесения ( $N=1$ ) в приеме сигнала (*таблица 3*) существует оптимальное значение  $h_{opt}^2 = y_{opt}$ , при котором вероятность  $P_{bn}$  минимальная;

- разнесение приема позволяет уменьшить вероятность  $P_{bn}$  при  $h_{opt}^2$  (например, при  $N=1$ ,  $h_0^2=1000$ ,  $h_{opt}^2=4,875$  значение  $P_b = 5,76 \cdot 10^{-3}$ , при  $N=2$ ,  $h_0^2=1000$ ,  $h_{opt}^2=3,076$  значение  $P_b = 1,076 \cdot 10^{-3}$ , при  $N=4$ ,  $h_0^2=1000$ ,  $h_{opt}^2=1,542$  значение  $P_b = 6,08 \cdot 10^{-4}$ );

- увеличение медианного отношения сигнал/шум  $h_0^2$  способствует уменьшению вероятности  $P_{bn}$  при  $h_{opt}^2$ .

Оценки вероятностей  $P_{bn}$  для различных  $N$  с учетом узкополосных стационарных помех ( $\frac{P_{II}}{P_C} > 0$ ) без расширения спектра сигнала ( $B=1$ )

представлены в *таблице 5*.

Сравнивая результаты оценок вероятностей  $P_{bn}$  для  $\frac{P_{II}}{P_C} > 0$ , представленных в *таблицах 3, 4, 5* можно сделать важные выводы:

- во всех случаях существует оптимальное значение  $h_{opt}^2 = y_{opt}$ , при котором вероятность  $P_{bn}$  минимальная;

- наличие преднамеренной помехи ( $\frac{P_{II}}{P_C} > 0$ ) приводит к существенному повышению вероятности  $P_{bn}$  при  $h_{opt}^2$  (например, при  $\frac{P_{II}}{P_C} = 0$ ,  $N=4$ ,  $h_{opt}^2=1,542$ ,  $h_0^2=1000$  значение  $P_{bn} = 6,08 \cdot 10^{-4}$ , а при  $\frac{P_{II}}{P_C} = 0,5$  значение  $P_{bn} = 0,0331$  соответствует  $h_{opt}^2 = 5,2966$ ), что требует специальных мер защиты от преднамеренных помех.

Известно [1,2], что расширение спектра сигнала ( $B \gg 1$ ) приводит к повышению помехоустойчивости систем передачи данных с относи-

**Таблица 4**  
Оценки вероятностей  $P_{bn}$  для  $N=2, N=4$ ,

$N=2$	$h_0^2=500$	$y$	0,68	1,42	<b>2,78</b>	10	50,119	100
		$P_{bn}$	0,05	0,01	<b><math>3,2 \cdot 10^{-3}</math></b>	0,01	0,0489	0,095
	$h_0^2=10^3$	$y$	0,68	1,38	<b>3,076</b>	10	50,119	100
		$P_{bn}$	0,05	0,01	<b><math>1,763 \cdot 10^{-3}</math></b>	$4,988 \cdot 10^{-3}$	0,02475	0,0488
	$h_0^2=5000$	$y$	0,673	1,355	<b>3,802</b>	10	50,119	100
		$P_{bn}$	0,05	0,01	<b><math>4,33 \cdot 10^{-4}</math></b>	0,001	$5 \cdot 10^{-3}$	0,01
$N=4$	$h_0^2=500$	$P_{bn}$	0,34	0,6792	<b>1,706</b>	10	20,137	100
		$P_{bn}$	0,05	0,01	<b><math>9,63 \cdot 10^{-4}</math></b>	$5 \cdot 10^{-3}$	0,01	0,0488
	$h_0^2=10^3$	$y$	0,337	0,68	<b>1,542</b>	10	40,55	100
		$P_{bn}$	0,05	0,01	<b><math>6,08 \cdot 10^{-4}</math></b>	$2,5 \cdot 10^{-3}$	0,01	0,0277
	$h_0^2=5000$	$y$	0,3373	0,673	<b>2,25</b>	10	50,119	100
		$P_{bn}$	0,05	0,01	<b><math>1,288 \cdot 10^{-4}</math></b>	$5 \cdot 10^{-4}$	$2,51 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$

**Таблица 5**  
Оценки вероятностей  $P_{bn}$  для  $\frac{P_{II}}{P_C} > 0$

$N=1, h_0^2=10^3$ $P_{II}/P_C=0,5$	$y$	3	<b>10,965</b>	50,119	81,66	
	$P_{bn}$	0,0639	<b>0,0435</b>	0,0726	0,1	
$N=2, h_0^2=10^3$ $P_{II}/P_C=0,5$	$y$	3	<b>7,586</b>	10,965	50,119	82,414
	$P_{bn}$	0,0446	<b>0,0374</b>	0,03838	0,07156	0,1
$N=4, h_0^2=10^3$ $P_{II}/P_C=0,5$	$y$	3	<b>5,2966</b>	10,965	50,119	82,414
	$P_{bn}$	0,03496	<b>0,0331</b>	0,0359	0,071	0,1

## РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

тельной фазовой манипуляцией. Полученное выражение (5) позволяет оценить влияние базы сигнала  $B$  на помехоустойчивость радиоканала с разнесенным приемом (таблица 6).

Анализ таблицы 6 показывает:

- увеличение базы сигнала ( $B=128$ ) позволяет обеспечивать вероятность  $P_{bn} \cong 0,043$  при мощных узкополосных помехах ( $\frac{P_{ш}}{P_c} = 70$ ), при этом кратность разнеса приемных антенн  $N$  большого значения не имеет (для  $N=2$  и  $N=4$  значения  $P_{bn}$  примерно одинаковые);

- даже при небольшом коэффициенте расширения спектра сигнала ( $B=16$ ) можно обеспечить  $P_{bn} \cong 0,043$ , однако надо использовать  $N=4$  приемных антенн, а отношение  $h_0^2 = 5000$ ;

- при  $\frac{P_{ш}}{P_c} > 10$  значение  $h_{opt}^2 = y_{opt}$  требуется увеличивать (в наших примерах  $h_{opt}^2 = y_{opt} \geq 5,445$ ).

Таким образом, в условиях воздействия преднамеренных узкополосных помех разнесенный прием и расширение спектра сигнала позволяют успешно решить задачу обеспечения

требуемой помехоустойчивости и надежности по помехоустойчивости декаметрового канала передачи данных.

### Литература

1. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е., Шестопапов В.И. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов прямой модуляцией псевдослучайной последовательностью / Под ред. В.И. Борисова. Изд. 2-е переработанное и доп. М.: РадиоСофт, 2011. 550 с.
2. Зеленевский В.В., Черноусов М.С., Зеленевский А.В., Кургузов В.В. Статистический анализ и методика оценки надежности радиоканала по помехоустойчивости при наличии замираний сигнала // Известия Института инженерной физики, 2020. №3(57). С.13-18.
3. Пространственная обработка сигналов в ММО-системах сотовой связи / Ермолаев В.Т., Флакман А.Г., Елохин А.В., Сорокин И.С. Уч. пособ. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2020. 134 с.

**Таблица 6**  
Оценки вероятностей  $P_{bn}$  для  $B \gg 1$

$N=1, h_0^2=10^3$ $P_{ш}/P_c=1, B=16$	$y$	0,871	3	<b>5,86</b>	10,965	50,119	105,68
	$P_{bn}$	0,1	0,0153	<b><math>7,534 \cdot 10^{-3}</math></b>	0,01106	0,0489	0,1
$N=2, h_0^2=10^3$ $P_{ш}/P_c=1, B=16$	$y$	0,4325	1,42	<b>3,467</b>	5,86	10,965	100
	$P_{bn}$	0,1	0,01546	<b><math>4,39 \cdot 10^{-3}</math></b>	$5,96 \cdot 10^{-3}$	0,0109	0,095
$N=4, h_0^2=10^3$ $P_{ш}/P_c=70, B=128$	$y$	0,3733	1	<b>5,445</b>	10	50,119	77,27
	$P_{bn}$	0,1	0,0575	<b>0,038</b>	0,04039	0,07597	0,1
$N=2, h_0^2=10^3$ $P_{ш}/P_c=70, B=128$	$y$	1	3,4677	<b>7,73</b>	10	50,119	76,56
	$P_{bn}$	0,0844	0,0478	<b>0,0427</b>	0,0432	0,0765	0,1
$N=4, h_0^2=5000$ $P_{ш}/P_c=10, B=16$	$y$	0,4207	1	5,8614	<b>12,246</b>	100	340
	$P_{bn}$	0,1	0,0655	0,0429	<b>0,04154</b>	0,0562	0,1

## ОЦЕНИВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ АБОНЕНТСКОГО ТРАФИКА В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ, ПОСТРОЕННЫХ НА ОСНОВЕ ШИРОКОВЕЩАТЕЛЬНЫХ РАДИОСЕТЕЙ

### ASSESSING THE INTENSITY OF SUBSCRIBER TRAFFIC IN TELECOMMUNICATION SYSTEMS BUILT ON THE BASIS OF BROADCAST RADIO NETWORKS

**Алексей Игоревич Алаторцев**

доктор технических наук  
начальник управления системных исследований  
АНО «Институт инженерной физики»  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: 8 (903) 183-94-86  
E-mail: alexalat@yandex.ru

**Алексей Александрович Крикунов**

кандидат технических наук  
старший преподаватель кафедры  
«Исследования операций и систем»  
филиал ВА РВСН им. Петра Великого  
(г. Серпухов)  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17  
Тел.: 8 (905) 750-89-40  
E-mail: leha-krik1985@yandex.ru

#### Аннотация

В статье рассматривается способ повышения точности при решении задачи идентификации параметров передаваемого трафика в широковещательной радиосети в условиях значительной нестационарности абонентской нагрузки. Способ основан на косвенном интервальном оценивании интенсивности первичного абонентского трафика. Предложенный подход может применяться при различных алгоритмах случайного доступа в радиосети, а также в условиях нескольких групп разнородных абонентов. Основное достоинство предложенного подхода заключается в повышении устойчивости информационного обмена в телекоммуникационных системах, базирующихся на каналах передачи данных радиосетей случайного доступа в условиях адаптивного управления параметрами протоколов.

**Ключевые слова:** случайный множественный доступ, телекоммуникационные системы, косвенное интервальное оценивание абонентской нагрузки, широковещательные сети.

#### Summary

The article considers a way to increase accuracy in solving the problem of identifying the parameters of transmitted traffic in a broadcast radio network in conditions of significant unsteadiness of the subscriber load. The method is based on an indirect interval estimation of the intensity of primary subscriber traffic. The proposed approach can be applied with various random access algorithms in the radio network, as well as in conditions of several groups of heterogeneous subscribers. The main advantage of the proposed approach is to increase the stability of information exchange in telecommunication systems based on data transmission channels of random access radio networks in conditions of adaptive protocol parameter control.

**Keywords:** random multiple access, telecommunication systems, indirect interval estimation of subscriber load, broadcast networks.

Одним из наиболее распространенных подходов к разделению коммуникационного ресурса в современных радиосетях является организация случайного множественного доступа (СМД). Известно, что этот способ является, по сути, самым эффективным в плане использова-

ния пропускной способности сети в условиях пульсирующего трафика и в настоящее время применяется как для передачи абонентского, так и служебного трафика телекоммуникационных систем [2,8].

Один из известных способов обеспечения

требуемого уровня устойчивости канала случайного множественного доступа при поддержании характеристик обмена пакетами данных на уровне, близком к оптимальному [1,2,8], основан на введении в канал системы адаптации его параметров. В этом случае в канале некоторым образом организуется самостоятельная, автоматическая перестройка его динамических свойств (его параметров или структуры в смысле числа физических каналов) вслед за изменением свойств внешних воздействий – первичного абонентского трафика – с целью обеспечения успешного функционирования в каждой конкретной ситуации.

В общем случае процесс адаптации системы включает в себя такие функциональные составляющие как идентификацию текущего состояния системы, прогнозирование поведения системы в будущем и принятие решения на целенаправленное изменение параметров или структуры системы, причем с технической точки зрения наибольшую трудность представляет первый этап.

Любой алгоритм случайного доступа предполагает возможность возникновения коллизий, кроме того, передаваемые данные могут быть потеряны вследствие воздействия помех. Абонент, не сумевший передать свой пакет, переходит в режим повторной передачи, следовательно, суммарный трафик в канале представляет собой совокупный поток первичных и повторно передаваемых пакетов, которые могут вступать в конфликт между собой. Таким образом, число первичных пакетов, сгенерированных абонентами сети на каком-то временном интервале, и число успешно переданных (зафиксированных адресатом) в общем случае не совпадают, что не позволяет осуществить прямое измерение параметра нестационарного первичного трафика.

Рассмотрим задачу идентификации первичного трафика на примере широкополосной радиосети с конечным числом однородных абонентов –  $N$ , передача информации в которой синхронизирована по временным тактам (окнам). Парциальная нагрузка каждого абонента является стационарной пуассоновской и характеризуется вероятностью  $p_0$  появления пакета в очередном такте. Длительность одного такта –  $T_{\text{окн}}$  может быть, например, привязана к времени передачи одного пакета данных –  $T_n$ . В режиме повторной передачи абоненты пытаются передать имеющийся пакет данных в очередном такте с вероятностью  $p_r$  – параметр «настойчивости» [1,2]. Допустим, что весь переданный трафик радиосети фиксируется некоторой центральной станцией. Требуется определить неизвест-

ное значение первичной активности (параметра трафика)  $p_0$ , при условии возможной нестационарности абонентской нагрузки.

Эффективность работы протокола СМД можно оценить, по следующим показателям: относительная пропускная способность  $C_k$  и средняя задержка при передаче пакета  $\bar{T}$ , которые определяются известными выражениями:

$$C_k = (N - \bar{n})p_0, \quad \bar{T} = \frac{\bar{n}}{C_k} \quad (1)$$

где  $\bar{n}$  – среднее число абонентов, находящихся в режиме повторной передачи.

Известный способ определения параметра первичного трафика [1] основан на прямом измерении этих показателей и косвенной оценке требуемой величины с помощью выражения (1).

Выражения для нахождения точечных оценок  $\hat{C}$  и  $\hat{T}$  известны из [1].

Формулы для косвенной точечной оценки параметра трафика и среднего числа абонентов в режиме повторной передачи:

$$\hat{n} = \hat{T} \cdot \hat{C}, \quad \hat{p}_{0\_c\_r} = \frac{\hat{C}}{N - \hat{T} \cdot \hat{C}} \quad (2)$$

Известным недостатком точечных оценок, тем более косвенных, является степень доверия к их значениям. Для гарантированного обеспечения устойчивой работы канала СМД необходимо перейти к интервальному или квантильному оцениванию. Тем не менее, актуальным остается вопрос повышения точности полученных значений, поскольку гарантированное исключение возможности блокировки канала, в условиях большой дисперсии точечных оценок все равно приводит к снижению эффективности функционирования протокола [1,4,7].

Очевидно, что в рассматриваемом случае, повышение точности измерений возможно только за счет увеличения объема накопленной информации о наблюдаемом процессе. При ограниченном интервале наблюдения, т.е. количестве отсчетов –  $\tau_g$  это можно осуществить путем расширения пространства измеряемых (фиксируемых) характеристик канала. Помимо указанных выше, предлагается фиксировать временные сегменты, в которых не было активности абонентов (попыток передать пакет), что технически несложно реализовать в современных радиомодемах. Таким образом, будем рассматривать величину  $Z$  – вероятность молчания всех абонентов. Согласно выбранной модели трафика:

$$Z = e^{-((N-n)p_0 + n p_r)} \quad (3)$$

Точечная оценка этой величины:

$$\hat{Z} = \frac{v}{\tau_g}, \quad (4)$$

где  $v$  – число временных сегментов на интервале наблюдения, в которых не было зафиксиро-

вано успешных либо неуспешных попыток передачи пакета.

Из (2) и (3) можно получить новое выражение для точечной оценки параметра трафика:

$$\hat{p}_{0,Z,T} = -\frac{\ln(\hat{Z})}{NTpr + \hat{T} \ln(\hat{Z}) + N}. \quad (5)$$

Оценки  $\hat{p}_{0,Z,T}$  и  $\hat{p}_{0,C,T}$  можно рассматривать как результаты двух неравноточных измерений величины  $p_0$  на предыдущем интервале наблюдения. Очевидно, что данные оценки зависимы между собой, тем не менее, использование дополнительной информации (измерения) положительно влияет на точность результата в целом [4,7]. Итоговое выражение для точечной статистической оценки первичной активности абонентов:

$$\begin{aligned} \hat{p}_0 &= \left( \frac{\hat{p}_{0,Z,T}}{\sigma_{\hat{p}_{0,Z,T}}^2} + \frac{\hat{p}_{0,C,T}}{\sigma_{\hat{p}_{0,C,T}}^2} \right) / \left( \frac{1}{\sigma_{\hat{p}_{0,Z,T}}^2} + \frac{1}{\sigma_{\hat{p}_{0,C,T}}^2} \right) = \\ &= \frac{(\sigma_{\hat{p}_{0,C,T}}^2 \cdot \hat{p}_{0,Z,T} + \sigma_{\hat{p}_{0,Z,T}}^2 \cdot \hat{p}_{0,C,T})}{\sigma_{\hat{p}_{0,Z,T}}^2 + \sigma_{\hat{p}_{0,C,T}}^2}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\sigma_{\hat{p}_{0,Z,T}}, \sigma_{\hat{p}_{0,C,T}}$  – средние квадратические отклонения (СКО) точечных оценок, полученных по (2) и (5) соответственно, которые характеризуют их точность. По известной теореме о дисперсии суммы двух случайных величин, СКО оценки по (6) определяется выражением:

$$\sigma_{\hat{p}_0} = \sqrt{\frac{\sigma_{\hat{p}_{0,Z,T}}^2 \cdot \sigma_{\hat{p}_{0,C,T}}^2 + 2 \cdot K_{(\hat{p}_{0,Z,T}, \hat{p}_{0,C,T})} \cdot \sigma_{\hat{p}_{0,Z,T}} \cdot \sigma_{\hat{p}_{0,C,T}}}{(\sigma_{\hat{p}_{0,Z,T}}^2 + \sigma_{\hat{p}_{0,C,T}}^2)^2}}, \quad (7)$$

где  $K_{(\hat{p}_{0,Z,T}, \hat{p}_{0,C,T})}$  – корреляционный момент связи случайных величин  $\hat{p}_{0,Z,T}$  и  $\hat{p}_{0,C,T}$ .

Согласно общей методики расчета интервальных оценок, указанные СКО можно рассматривать как объективную меру точности для точечных косвенных оценок параметра трафика, при этом для дальнейших вычислений необходимо определить их частные и совместные законы распределения.

Рассмотрим законы распределения точечных статистических оценок измеряемых характеристик –  $C^*, \bar{T}^*, Z^*$ . Исходя из ожидаемой длительности интервала наблюдения, величины  $C^*, Z^*$  подчиняются нормальному закону распределения, величина  $\bar{T}^*$  в зависимости от объема выборки может быть распределена как по нормальному закону, так и по закону Стьюдента [5,6].

Введем обозначения:

$\hat{Z}, \hat{C}, \hat{T}$  – точечные оценки, полученные по итогам последнего интервала наблюдения;

$\sigma_{\hat{T}}, \sigma_{\hat{N}}, \sigma_{\hat{Z}}$  – СКО точечных оценок [5].

Далее в статье для краткости рассматривается только случай нормального распределения точечной оценки среднего времени задержки, однако полученные результаты легко обобщаются для случая малой выборки, путем замены выражения для плотности распределения.

Косвенные оценки  $p_{0,\hat{N},T}^*(C^*, \bar{T}^*)$  и  $p_{0,Z,T}^*(Z^*, \bar{T}^*)$  являются функциями двух случайных величин  $C^*, \bar{T}^*$  и  $Z^*, \bar{T}^*$  соответственно, с известными законами распределения. Для нахождения  $f(p_{0,\hat{N},T}^*)$  и  $f(p_{0,Z,T}^*)$  воспользуемся алгоритмом предложенным в [1], введя допущение о попарной независимости распределений соответствующих случайных величин. Тогда плотности совместного их распределения определяются произведениями:

$$f(C^*, \bar{T}^*) = f(C^*) \cdot f(\bar{T}^*). \quad (8)$$

$$f(Z^*, \bar{T}^*) = f(Z^*) \cdot f(\bar{T}^*). \quad (9)$$

Выберем вторую функцию случайных величин  $C^*$  и  $\bar{T}^*$  –  $\bar{n}_{C,T}^* = \bar{n}^*(C^*, \bar{T}^*)$ .

Области определения обеих функций известны из математической модели канала:  $D_{p_{0,C,T}^*} = D_{p_0} = (0,1)$ ,  $D_{\bar{n}_{C,T}^*} = D_{\bar{n}} = (0, N)$ .

Плотность совместного распределения случайных косвенных оценок  $p_{0,\hat{N},T}^*$  и  $\bar{n}_{C,T}^*$  находим из соотношения:

$$f_{C,T}(p_{0,C,T}^*, \bar{n}_{C,T}^*) = f[C(p_{0,C,T}^*, \bar{n}_{C,T}^*), \bar{T}(p_{0,C,T}^*, \bar{n}_{C,T}^*)] \cdot |J_{C,T}|, \quad (10)$$

где  $C(p_{0,\hat{N},T}^*, \bar{n}_{C,T}^*)$ ,  $\bar{T}(p_{0,\hat{N},T}^*, \bar{n}_{C,T}^*)$  – взаимно однозначные обратные функции;

$J_{C,T}$  – якобиан преобразования, определяемый по формуле:

$$|J_{C,T}| = \frac{1}{p_{0,C,T}^*}. \quad (11)$$

После подстановки получим:

$$\begin{aligned} f_{C,T}(p_{0,C,T}^*, \bar{n}_{C,T}^*) &= \frac{1}{2\pi p_{0,C,T}^* \cdot \sigma_C \cdot \sigma_T} \cdot \\ &\cdot \exp \left[ -\frac{1}{2\sigma_C^2} (p_{0,C,T}^* (N - \bar{n}_{C,T}^*) - \bar{C})^2 \right] \cdot \exp \left[ -\frac{1}{2\sigma_T^2} \left( \frac{\bar{n}_{C,T}^*}{p_{0,C,T}^* (N - \bar{n}_{C,T}^*)} - \bar{T} \right)^2 \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

Численно интегрируя функцию (12) по области определения  $D_{\bar{n}_{C,T}^*}$ , получаем плотность распределения:

$$f_{C,T}(p_{0,C,T}^*) = \int_{D_{\bar{n}_{C,T}^*}} f_{C,T}(p_{0,C,T}^*, \bar{n}_{C,T}^*) d\bar{n}_{C,T}^*. \quad (13)$$

По известной плотности распределения вычисляем СКО точечной оценки

$$\sigma_{p_{0,C,T}^*} = \sqrt{\int_{D_{p_0}} (p_{0,C,T}^*)^2 f_{C,T}(p_{0,C,T}^*) dp_{0,C,T}^* - (\hat{p}_{0,C,T})^2}. \quad (14)$$

Зная закон распределения точечной оценки, можно найти верхнюю границу параметра трафика с требуемой надежностью, таким образом решить поставленную задачу идентификации. Этот метод подробно описан в [1,3]. В данной статье рассматривается возможность повышения точности предложенного метода за счет учета величины  $Z^*$ .

Аналогично изложенному выше, якобиан преобразования:

$$|J_{Z_T}| = e^{-(N-\bar{n}_{Z_T})P_{0,Z_T}^* + \bar{n}_{Z_T}^* \cdot P} \cdot \frac{N \cdot P_{0,Z_T}^* + \bar{n}_{Z_T}^* \cdot (P - P_{0,Z_T}^*)}{(N - \bar{n}_{Z_T}^*) \cdot P_{0,Z_T}^2} \quad (15)$$

Плотность совместного распределения случайных косвенных оценок  $P_{0,Z_T}^*$  и  $\bar{n}_{Z_T}^*$  определяется выражением:

$$f_{Z_T}(P_{0,Z_T}^*, \bar{n}_{Z_T}^*) = \frac{1}{2\pi \cdot \sigma_{Z^*} \cdot \sigma_{\bar{T}^*}} \exp \left[ -\frac{1}{2\sigma_{Z^*}^2} \left( e^{-(N-\bar{n}_{Z_T}^*)P_{0,Z_T}^* + \bar{n}_{Z_T}^* \cdot P} - \hat{Z} \right)^2 \right] \cdot \exp \left[ -\frac{1}{2\sigma_{\bar{T}^*}^2} \left( \frac{\bar{n}_{Z_T}^*}{P_{0,Z_T}^* (N - \bar{n}_{Z_T}^*)} - \bar{T}^* \right)^2 \right] \cdot |J_{Z_T}| \quad (16)$$

Плотность распределения точечной оценки  $P_{0,Z_T}^*$  и ее СКО  $\sigma_{P_{0,Z_T}^*}$  находим аналогично.

Для расчёта корреляционного момента  $K_{(P_{0,Z_T}^*) \times (P_{0,C_T}^*)}$  необходимо найти совместную плотность распределения косвенных оценок –  $f_p(P_{0,Z_T}^*, P_{0,C_T}^*)$ . Сделать это можно, рассмотрев совместное распределение трех случайных величин  $C^*$ ,  $\bar{T}^*$  и  $Z^*$ . Дополнительная трудность заключается в том, что величины  $C^*$  и  $Z^*$  являются зависимыми между собой. Их коэффициент корреляции в соответствии с [6,7] может быть найден как коэффициент корреляции частот наступления зависимых несовместных случайных событий по известному выражению:

$$r_{(C^*) \times (Z^*)} = \sqrt{\frac{Z^* \cdot C^*}{(1 - Z^*) \cdot (1 - C^*)}} \quad (17)$$

Тогда используя известное выражение для совместной плотности распределения двух зависимых нормально распределенных случайных величин  $C^*$ ,  $Z^*$ , а также учитывая попарную независимость величин  $C^*$ ,  $\bar{T}^*$  и  $Z^*$ ,  $\bar{T}^*$ , получим плотность совместного распределения всех измеряемых параметров.

Аналогично изложенному выше алгоритму, определим совместную плотность распределения случайных величин  $P_{0,Z_T}^*$ ,  $P_{0,C_T}^*$  и  $\bar{n}^*$ :

$$f_{\text{совм}}(P_{0,C_T}^*, P_{0,Z_T}^*, \bar{n}^*) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \cdot \sigma_{C^*} \cdot \sigma_{Z^*} \cdot \sigma_{\bar{T}^*} \cdot \sqrt{1 - r_{(C^*) \times (Z^*)}^2}} \cdot \exp \left[ -\frac{1}{1 - r_{(C^*) \times (Z^*)}^2} \left( -\frac{1}{2\sigma_{C^*}^2} (P_{0,C_T}^* (N - \bar{n}^*) - \hat{C}) - r_{(C^*) \times (Z^*)} \cdot \frac{(P_{0,Z_T}^* (N - \bar{n}^*) - \hat{Z}) \cdot (e^{-(N-\bar{n}_{Z_T}^*)P_{0,Z_T}^* + \bar{n}_{Z_T}^* \cdot P} - \hat{Z})}{\sigma_{C^*} \cdot \sigma_{Z^*}} + \frac{1}{2\sigma_{Z^*}^2} (e^{-(N-\bar{n}_{Z_T}^*)P_{0,Z_T}^* + \bar{n}_{Z_T}^* \cdot P} - \hat{Z}) \right)^2 \right] \cdot \exp \left[ -\frac{1}{2\sigma_{\bar{T}^*}^2} \left( \frac{\bar{n}^*}{P_{0,C_T}^* (N - \bar{n}^*)} - \bar{T}^* \right)^2 \right] \cdot |J_{Z_T,C}| \quad (18)$$

$$|J_{Z_T,C}| = \frac{e^{-(N-\bar{n}^*)P_{0,Z_T}^* + \bar{n}^* \cdot P} \cdot (N - \bar{n}^*)}{P_{0,C_T}^*} \quad (19)$$

Совместная плотность распределения косвенных оценок:

$$f_p(P_{0,Z_T}^*, P_{0,C_T}^*) = \int_{D_2} f_{\text{совм}}(P_{0,C_T}^*, P_{0,Z_T}^*, \bar{n}^*) d\bar{n}^* \quad (20)$$

что позволяет найти их корреляционный момент связи  $K_{(P_{0,Z_T}^*) \times (P_{0,C_T}^*)}$ .

Таким образом можно рассчитать СКО точечной оценки параметра трафика, учитывающей все три измеряемые характеристики. Сравнив с величинами, найденными ранее, получим выигрыш в точности идентификации по сравнению с известным методом. Данный выигрыш (уменьшение СКО), согласно результатам моделирования, составляет 35-45%.

Для законченного решения задачи идентификации абонентской нагрузки необходимо найти закон распределения косвенной оценки. Введем обозначения:

$$a_1 = \frac{\sigma_{P_{0,Z_T}^*}^2 + \sigma_{P_{0,C_T}^*}^2}{\sigma_{P_{0,Z_T}^*}^2}, a_2 = \frac{\sigma_{P_{0,Z_T}^*}^2 + \sigma_{P_{0,C_T}^*}^2}{\sigma_{P_{0,C_T}^*}^2}, p_2 = \frac{\hat{P}_{0,Z_T}}{a_2}, p_1 = \frac{\hat{P}_{0,C_T}}{a_1} \quad (21)$$

Аналогично использованному ранее алгоритму, с учетом формулы для плотности распределения суммы двух случайных величин [7], получим следующее выражение:

$$g_{\text{совм}}(P_0^*, P_1^*, \bar{n}^*) = \frac{a_2 \cdot (N - \bar{n}^*)}{(2\pi)^{3/2} \cdot \sigma_{C^*} \cdot \sigma_{Z^*} \cdot \sigma_{\bar{T}^*} \cdot \sqrt{1 - r_{(C^*) \times (Z^*)}^2} \cdot P_1} \cdot \exp \left[ -\frac{1}{1 - r_{(C^*) \times (Z^*)}^2} \left( -\frac{1}{2\sigma_{C^*}^2} (a_1 \cdot P_1 (N - \bar{n}^*) - \hat{C}) - r_{(C^*) \times (Z^*)} \cdot \frac{(a_1 \cdot P_1 (N - \bar{n}^*) - \hat{C}) \cdot (e^{-(N-\bar{n}^*)a_2 \cdot (P_0^* - P_1) + \bar{n}^* \cdot P} - \hat{Z})}{\sigma_{C^*} \cdot \sigma_{Z^*}} + \frac{1}{2\sigma_{Z^*}^2} (e^{-(N-\bar{n}^*)a_2 \cdot (P_0^* - P_1) + \bar{n}^* \cdot P} - \hat{Z}) \right)^2 \right] \cdot \exp \left[ -\frac{1}{2\sigma_{\bar{T}^*}^2} \left( \frac{\bar{n}^*}{a_1 \cdot P_1 \cdot (N - \bar{n}^*)} - \bar{T}^* \right)^2 \right] \cdot \exp \left[ -(N - \bar{n}^*) \cdot a_2 \cdot (P_0^* - P_1) + \bar{n}^* \cdot P \right] \quad (22)$$

где  $P_0^*$  – искомая оценка параметра трафика.

Отсюда находим частную плотность распределения случайной величины  $P_0^*$ :

$$f_p(P_0^*) = \int_0^{\hat{Z}} \int_{D_2} g_{\text{совм}}(P_0^*, P_1^*, \bar{n}^*) d\bar{n}^* dP_1^* \quad (23)$$

При практической реализации описанного метода, достаточно найти закон распределения, СКО  $\sigma_{P_0^*}$  можно использовать на этапе моделирования систем связи для приблизительной оценки точности процедуры идентификации абонентской нагрузки. В целом, предложенный подход в условиях динамики нагрузки, структуры широкополосной сети и адаптивном оптимальном управлении параметрами протоколов случайного множественного доступа по-

## РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

зволят, наряду с эффективным использованием канального ресурса, существенно повысить устойчивость информационного обмена в телекоммуникационных системах.

### Литература

1. Шиманов С.Н. Устойчивость функционирования запросно-вызывных каналов спутниковой системы связи РВСН: дис. док. техн. наук. Серпухов, 2002. 238 с.
2. Бунин С.Г., Войтер А.П. Вычислительные сети с пакетной радиосвязью. Киев: Техника, 1989. 220 с.
3. Устойчивые статические методы оценки данных / Пер. с англ. Ю.И. Малахова; под ред. Н.Г. Волкова. М.: Машиностроение, 1984. 232 с.
4. Эльясберг П.Е. Измерительная информация: сколько ее нужно? как ее обрабатывать? М.: Наука. 1983. 208 с.
5. Горобец Б.С. Теория вероятностей, математическая статистика и элементы случайных процессов: Упрощенный курс / Предисл. А.А. Рухадзе. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2016. 232 с.
6. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: Учеб. для вузов. М.: Высшая школа, 2002. 575 с.
7. Крикунов А.А., Шиманов С.Н., Ковальков Д.А. Оценка интенсивности абонентской нагрузки в широковещательной радиосети // Всероссийск. конф. «Современные технологии обработки сигналов» (СТОС-2019); Доклады; Серия: науч. всероссийские конференции / Рос. науч.-техн. общ. радиотехн., электрон. и связи им. А.С. Попова. М.: ООО «БРИС-М», 2019. Вып. VII. С.52–57.
8. Таненбаум Э., Уэзеролл Д. Компьютерные сети. СПб.: Издательский дом ПИТЕР, 2022. 960 с.: ил.

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.052.2

## ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА РЕЗЕРВИРОВАНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ЭВМ JUSTIFICATION OF THE METHOD OF RESERVATION OF SPECIALIZED COMPUTERS

**Алексей Николаевич Царьков**  
заслуженный деятель науки РФ  
доктор технических наук, профессор  
Президент АНО «Институт инженерной физики»  
Адрес: 142210 Московская обл., г. Серпухов,  
Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7 (4967) 35-31-93  
E-mail: antcarkov@iifmail.ru

**Александр Алексеевич Павлов**  
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 (4967) 72-19-11  
E-mail: pavlov\_iif@mail.ru

**Владимир Петрович Пашинцев**  
заслуженный работник высшей школы РФ  
почетный радист РФ  
доктор технических наук, профессор  
профессор кафедры  
«Информационная безопасность автоматизированных систем»  
Северо-Кавказский федеральный университет  
Адрес: 355017, Россия, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1  
E-mail: pasintsevp@mail.ru

**Юрий Александрович Романенко**  
доктор технических наук, профессор  
ведущий научный сотрудник  
филиал ВА РВСН им. Петра Великого  
(г. Серпухов)

**Александр Юрьевич Романенко**  
кандидат технических наук  
научный сотрудник  
АНО «Институт инженерной физики»

Максим Игоревич Макеев  
научный сотрудник  
филиал ВА РВСН им. Петра Великого  
(г. Серпухов)

Фёдор Алексеевич Павлов  
научный сотрудник  
филиал ВА РВСН им. Петра Великого  
(г. Серпухов)

### Аннотация

Осуществлен анализ эксплуатации и выбор показателей надежности для специализированных ЭВМ (СЭВМ) авиационно-космической техники. Сформулированы требования к методам резервирования СЭВМ. Проведена сравнительная оценка обнаруживающей способности и аппаратных затрат при реализации мажоритарного метода резервирования, метода дублирования и использования корректирующих кодов. Обоснована целесообразность использования метода дублирования для повышения вероятности безотказной работы и живучести самовосстанавливаемых СЭВМ, с использованием алгебраических линейных кодов, для выявления неисправного резервного канала. В отличие от известных кодов, предлагается использовать алгебраический линейный код, у которого, значения проверочных разрядов соответствуют прямым и инверсным значениям информационных разрядов, что позволяет обнаруживать ошибки при считывании информации с инверсных выходов ЗУ, корректировать одиночные ошибки, обнаруживать двойные ошибки и контролировать логическую операцию инвертирования, необходимую для представления отрицательного числа в дополнительном коде, что дает возможность адаптировать код для контроля арифметических и логических операций процессора СЭВМ. Проведена оценка вероятности безотказной работы дублированной СЭВМ, при ее общем резервировании, с обнаружением и коррекцией одиночных ошибок в резервных каналах ЗУ и обнаружением ошибок в резервных каналах АЛУ процессора на основе предлагаемого кода и оценка вероятности безотказной работы СЭВМ, при ее раздельном резервировании, с обнаружением ошибок в резервных каналах дублированного ЗУ на основе кода Хемминга и коррекцией ошибок в резервных каналах АЛУ процессора на основе мажоритарного метода. В результате сравнения вероятностей безотказной работы установлено, что общее резервирование СЭВМ на основе предлагаемого кода, по сравнению с раздельным резервированием ЗУ и АЛУ процессора СЭВМ позволяет обеспечить выигрыш в вероятности безотказной работы СЭВМ и ее функциональных устройств на всем периоде эксплуатации.

**Ключевые слова:** алгебраический линейный код, дополнительный код, операция инвертирования, мажоритарный метод резервирования, дублирование.

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

## Summary

An analysis of operation and selection of reliability indicators for specialized computers (SEVMs) of aerospace equipment was carried out. The requirements for the methods of redundant computer systems are formulated. A comparative evaluation of the detecting ability and hardware costs in the implementation of the majority method of redundancy, the method of duplication and the use of corrective codes is carried out. The expediency of using the duplication method to increase the probability of failure-free operation and survivability of self-healing digital computers, using algebraic linear codes, to identify a faulty backup channel is substantiated. Unlike the known codes, it is proposed to use an algebraic linear code, in which the values of the check bits correspond to the direct and inverse values of the information bits, which makes it possible to detect errors when reading information from the inverse outputs of the memory, correct single errors, detect double errors and control the logical operation of inverting required to represent a negative number in an additional code, which makes it possible to adapt the code to control the arithmetic and logical operations of the computer processor. The evaluation of the probability of failure-free operation of a duplicated computer, with its general redundancy, with the detection and correction of single errors in the backup memory channels and the detection of errors in the backup channels of the processor ALU based on the proposed code, and the assessment of the probability of failure-free operation of the computer, with its separate redundancy, with error detection in the backup channels of the duplicated memory based on the Hamming code and error correction in the backup channels of the processor ALU based on the majority method. As a result of comparing the probabilities of failure-free operation, it has been established that the total reservation of the computer based on the proposed code, in comparison with the separate reservation of the memory and ALU of the processor of the computer, makes it possible to provide a gain in the probability of failure-free operation of the computer and its functional units throughout the entire period of operation.

**Keywords:** algebraic linear code, additional code, inversion operation, majority redundancy method, duplication.

## 1. Введение

Современные системы управления объектами ракетно-космической (РКТ) техники характеризуется широким использованием специализированных ЭВМ (СЭВМ). В соответствии с ГОСТ 27.003-2016 [1] данные объекты имеют один основной вариант применения по назначению и относятся к объектам однократного применения (с предшествующим периодом ожидания применения).

По последствиям отказов они относятся к объектам отказы, которых приводят к катастрофическим последствиям, основным показателем надежности которых является вероятность безотказной работы. Важным свойством СЭВМ является живучесть, характеризующая ее способность противостоять дестабилизирующим факторам и отказам некоторых компонентов [2].

В этом случае, для парирования возникающих отказов СЭВМ должны иметь возможность самовосстановления, то есть, обеспечить возможность перехода ее в работоспособное состояние без вмешательства извне [2].

Целью работы является разработка методического аппарата построения средств обеспечения требуемого уровня вероятности безотказной работы и живучести самовосстанавливаемых СЭВМ.

## 2. Выбор метода резервирования СЭВМ

Для рассматриваемых объектов, методы резервирования должны отвечать следующим требованиям:

- иметь высокую обнаруживающую способность;
- использовать минимальные аппаратные

затраты на обнаружение отказов и восстановление работоспособного состояния;

- не оказывать существенного влияния на быстрое действие резервируемой СЭВМ;
- обеспечивать обнаружение отказов и восстановление работоспособности различных функциональных узлов СЭВМ (запоминающих устройств и узлов процессора ЭВМ).

В настоящее время для обеспечения требуемого уровня вероятности безотказности работы СЭВМ, широко используются структурные методы резервирования, включающие: мажоритарный метод, дублирование, корректирующие коды.

При мажоритарном резервировании коррекция ошибки осуществляется за счет использования результата одинаковой работы большинства основных элементов [2].

Достоинство мажоритарного метода резервирования:

- не оказывает существенного влияния на быстрое действие резервируемой СЭВМ;
- не требуется переключения на резервный блок, и как следствие, нет потери текущей информации;
- используется для общего резервирования СЭВМ;
- имеет высокую обнаруживающую способность.

**Утверждение 1.** Число не обнаруживаемых ошибок структурными методами равно:  $Q=2^k-1$ , где  $k$ -число информационных разрядов (не обнаруживаются ошибки, возникающие одновременно в одноименных разрядах).

**Следствие 1.** Обнаруживающая способность мажоритарного метода (два из трех) составит:

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

$$P_{об.м} = 1 - [(2^k - 1) / (2^{3k} - 1)].$$

Если каждая СЦВМ содержит по 32-информационных разрядов, то обнаруживающая способность мажоритарного метода равна:

$$P_{об.м} = 1 - \frac{4,295}{7,923 \cdot 10^{19}} \approx 1.$$

Недостатком мажоритарного метода является большие аппаратные затраты на резервирование.

Дублирование так же может использоваться для общего резервирования СЦВМ в нагруженном режиме с замещением.

Основной проблемой дублирования СЭВМ является выбор средств контроля для определения отказавшего канала (обнаружения ошибок в обрабатываемой информации). Для обеспечения максимально возможной обнаруживающей способности средств контроля, можно использовать идентичную СЭВМ, но, в этом случае, аппаратные затраты превысят аппаратные затраты, используемые при мажоритарном методе резервирования.

Эффективным методом обнаружения ошибок в СЭВМ является использование корректирующих кодов. Так, например, алгебраический линейный код с минимальным кодовым расстоянием  $d=3$ , позволяет корректировать одиночные ошибки или обнаруживать двойные ошибки при использовании 10-30% аппаратных затрат относительно резервируемого устройства.

К недостаткам использования корректирующих кодов следует отнести:

- как правило, используются для раздельного резервирования (обнаружения и коррекции ошибок, возникающих в запоминающих устройствах, для обнаружения и коррекции ошибок в АЛУ используется мажоритарное резервирование);

- не все коды могут быть адаптированы для обнаружения и коррекции ошибок в устройствах процессора.

- резкое увеличение аппаратных затрат при использовании алгебраических линейных кодов для обнаружения и коррекции кратных ошибок.

Для сокращения аппаратных затрат следует ограничиться использованием кода с  $d=3$ . Экспериментально установлено, что кода Хемминга (17,12), с минимальным кодовым расстоянием  $d=3$ , вероятность обнаружения ошибок произвольной кратности составляет:

$$P_{об.ХЭ} = 1 - 0,0313 = 0,9687.$$

Процент ошибок, не обнаруживаемых кодом Хемминга с  $d=3$ , составляет:  $Q_x = 3,13\%$ . Не обнаруживаются ошибки, которые переводят «запрещенный» (ошибочный) кодовый набор в

разрешенный (при котором синдром ошибки равен нулю). В этом случае, число запрещенных кодовых наборов составит:  $Q = 2^k - 1$ , тогда расчетная вероятность обнаружения ошибок произвольной кратности кодом Хемминга может быть определена по формуле:

$$P_{об.ХР} = 1 - [(2^k - 1) / (2^n - 1)],$$

где  $n = k + r$ ;  $r$ -число проверочных разрядов. Для кода Хемминга (17,12) получим:

$$P_{об.ХР} = 1 - \frac{4,095 \cdot 10^3}{1,311 \cdot 10^5} = 1 - 0,031 = 0,968,$$

то есть, можно считать, что  $P_{об.ХЭ} \approx P_{об.ХР}$

Таким образом, для сокращения аппаратных затрат при резервировании СЭВМ, следует использовать дублирование с замещением, а для обнаружения ошибок в резервных каналах, целесообразно использовать алгебраические линейные коды с  $d=3$ , позволяющее обнаруживать и корректировать одиночные ошибки в запоминающих устройствах и в устройствах процессора.

### 3. Выбор кода для обнаружения ошибок в резервных каналах

Для обнаружения ошибок при выполнении арифметической операции вычитания следует использовать код, позволяющий контролировать логическую операцию отрицания, необходимую для представления отрицательного числа в дополнительном коде. Алгоритм построения кода, контролирующего логическую операцию отрицания, представлен в работе [3] и включают следующие положения.

Для первых трех информационных разрядов формируются проверки

$$r_1 = y_1 \oplus y_2;$$

$$r_2 = y_2 \oplus y_3;$$

$$r_3 = y_1 \oplus y_3,$$

которые могут быть описаны первой проверочной матрицей:

$$H_1 = \begin{vmatrix} y_3 & y_2 & y_1 & r_3 & r_2 & r_1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Например, для двоичного набора 101 получим кодовый набор: 101 110.

Полученный код имеет минимальное кодовое расстояние  $d=3$ .

Рассматриваемый код обладает следующим свойством.

**Свойство 1.** Проверочные разряды для прямого и инверсного значения информационных разрядов имеют одинаковые значения.

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Для рассматриваемого примера, инверсным значениям информационных разрядов 010 соответствуют значения проверочных разрядов 110, что позволяет обнаруживать ошибки при выполнении операции инвертирования.

При использовании шести информационных разрядов проверочная матрица имеет вид:

$$H_2 = \begin{pmatrix} y_6 & y_5 & y_4 & y_3 & y_2 & y_1 & r_4 & r_3 & r_2 & r_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

**Свойство 2.** Если в  $i$ -ой строке информационной части проверочной матрицы содержится нечетное количество единиц, то для инверсного двоичного набора и значения  $i$ -го проверочного разряда выполняется условие:  $r_i^H = \bar{r}_i^H$  где  $r_i^H$  – значение проверочного разряда для прямого значения информационных разрядов.

Рассматриваемый код может корректировать одиночные ошибки при считывании информации с прямых и инверсных выходов ЗУ при условии обнаружения ошибок большей кратности. С этой целью осуществим модификацию кода (осуществим проверку на четность всего кодового набора).

**Свойство 3.** При четном числе информационных разрядов значение разряда проверки на четность имеет одинаковое значение для прямых и инверсных значений информационных разрядов, при нечетном числе информационных разрядов – инверсное значение.

При увеличении числа информационных разрядов до 32-х, получим проверочную матрицу  $H_3$ ,

$$H_3 = \begin{pmatrix} y_{32} & y_{31} & y_{30} & y_{29} & y_{28} & y_{27} & y_{26} & y_{25} & y_{24} & y_{23} & y_{22} & y_{21} & y_{20} & y_{19} & y_{18} & y_{17} & y_{16} & y_{15} & y_{14} & y_{13} \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} y_{12} & y_{11} & y_{10} & y_9 & y_8 & y_7 & y_6 & y_5 & y_4 & y_3 & y_2 & y_1 & r_7 & r_6 & r_5 & r_4 & r_3 & r_2 & r_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

В результате имеем семь проверок, которые формируются по правилу:

$$\begin{aligned} r_1 &= y_1 \oplus y_2 \oplus y_4 \oplus y_5 \oplus y_7 \oplus y_8 \oplus y_{10} \oplus y_{11} \oplus y_{12} \oplus y_{14} \oplus y_{16} \oplus \\ &\oplus y_{17} \oplus y_{19} \oplus y_{20} \oplus y_{22} \oplus y_{23} \oplus y_{25} \oplus y_{26} \oplus y_{28} \oplus y_{29} \oplus y_{31} \oplus y_{32}; \\ r_2 &= y_2 \oplus y_3 \oplus y_5 \oplus y_6 \oplus y_8 \oplus y_9 \oplus y_{11} \oplus y_{12} \oplus y_{14} \oplus y_{15} \oplus y_{17} \oplus \\ &\oplus y_{18} \oplus y_{20} \oplus y_{21} \oplus y_{23} \oplus y_{24} \oplus y_{26} \oplus y_{27} \oplus y_{29} \oplus y_{30} \oplus y_{32}; \\ r_3 &= y_1 \oplus y_3 \oplus y_4 \oplus y_6 \oplus y_7 \oplus y_9 \oplus y_{10} \oplus y_{12} \oplus y_{13} \oplus y_{15} \oplus y_{16} \oplus \\ &\oplus y_{18} \oplus y_{19} \oplus y_{21} \oplus y_{22} \oplus y_{24} \oplus y_{25} \oplus y_{27} \oplus y_{28} \oplus y_{30} \oplus y_{31}; \\ r_4 &= y_1 \oplus y_2 \oplus y_8 \oplus y_9 \oplus y_{10} \oplus y_{11} \oplus y_{12} \oplus y_{13} \oplus y_{14} \oplus y_{15} \oplus y_{19} \oplus \\ &\oplus y_{20} \oplus y_{21} \oplus y_{25} \oplus y_{26} \oplus y_{27} \oplus y_{28} \oplus y_{30} \oplus y_{31} \oplus y_{32}; \\ r_5 &= y_1 \oplus y_2 \oplus y_3 \oplus y_4 \oplus y_5 \oplus y_6 \oplus y_{13} \oplus y_{14} \oplus y_{15} \oplus y_{16} \oplus y_{17} \oplus \\ &\oplus y_{18} \oplus y_{25} \oplus y_{26} \oplus y_{27}; \\ r_6 &= y_{13} \oplus y_{14} \oplus y_{15} \oplus y_{16} \oplus y_{17} \oplus y_{18} \oplus y_{19} \oplus y_{20} \oplus y_{21} \oplus y_{22} \oplus y_{23} \oplus \\ &\oplus y_{24} \oplus y_{28} \oplus y_{29} \oplus y_{30}; \\ r_7 &= y_{25} \oplus y_{26} \oplus y_{27} \oplus y_{28} \oplus y_{29} \oplus y_{30} \oplus y_{31} \oplus y_{32}. \end{aligned}$$

Вероятность обнаружения ошибок кода (39,32) составит:  $P_{об.И} = 0,992$ .

Кроме контроля операции инвертирования, рассматриваемый код может быть адаптирован для выявления ошибок при выполнении процессорных функций по правилам, изложенным в работе [4,5]:

**Правило 1.** При выполнении арифметической операции сложения, осуществляется сложение по  $mod2$  проверочных разряды слагаемых  $u$ , полученный результат складывается по  $mod2$  с значением поправки формирования которой, осуществляется путем кодирования функции переносов выбранным методом кодирования.

**Правило 2.** При выполнении логической операции суммирования по  $mod2$ , результат сложения по  $mod 2$  проверочных разрядов слагаемых соответствует результату сложения по  $mod 2$  информационных разрядов рассматриваемых слагаемых.

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

**Правило 3.** При выполнении логической операции ИЛИ (И) осуществляется операция сложения по mod2 значений проверочных разрядов слагаемых, а к полученному результату прибавляется значение поправки, сформированной на основе кодирования информации полученной при выполнении логической операции И (ИЛИ) относительно рассматриваемых информационных разрядов.

Таким образом, при дублировании СЭВМ, для обнаружения ошибок в резервных каналах, целесообразно использовать корректирующий код с обнаружением ошибок при проведении операции инвертирования и адаптированно-го для обнаружения ошибок при проведении арифметических и логических операций.

### 4. Сравнительная оценка предлагаемого метода резервирования с существующими методами

Для повышения вероятности безотказной работы СЭВМ широко используется раздельное резервирование – дублирование ЗУ с обнаружением ошибок в каналах кодом Хемминга и мажоритарное резервирование процессора. Использование предлагаемого кода для обнаружения ошибок в резервных каналах СЭВМ позволяет осуществить общее резервирование. В связи с этим возникает необходимость проведения сравнительной оценки выигрыша в надежности от использования общего и раздельного резервирования СЭВМ.

Допустим, требуется осуществить резервирование 32-разрядной СЭВМ, с объемом памяти один килобайт 32-разрядных слов. Для приблизительной оценки аппаратных затрат на построение ЗУ и АЛУ процессора используем двухвходовые логические элементы, при этом будем считать, что: RS-триггер, включающий логические элементы (л.э.) для синхронизации процесса записи и считывания информации содержит 6 л.э.; простейший сумматор – 9 л.э.; полусумматор – 4 л.э.

В этом случае, аппаратные затраты на построение ЗУ составят 192000 л.э. Допустим интенсивность отказа одного простейшего логического элемента составляет:

$$\lambda = 10^{-11} \frac{1}{4},$$

тогда вероятность безотказной работы рассматриваемого ЗУ составит:

$$P_{ЗУ}(t) = e^{-\sum \lambda(t)t} = e^{-192000 * 10^{-11} t}.$$

Арифметико-логическое устройство процессора содержит: 32-х разрядный сумматор – 288 л.э.; 32-х разрядный регистр сумматора – 192 л.э.; регистр числа – 192 л.э., регистр дополнительный – 192 л.э., регистр дополнительного

кода – 192 л.э.; блок элементов И – 32 л.э., блок элементов ИЛИ – 32 л.э., блок сумматоров по mod – 128 л.э., блок инвертирования – 32 л.э. Аппаратурные затраты на построение АЛУ процессора СЭВМ составят – 1280 л.э.

Вероятность безотказной работы нерезервированного АЛУ равна:

$$P_{АЛУ}(t) = e^{-\sum \lambda(t)t} = e^{-1280 * 10^{-11} t}.$$

Общие аппаратные затраты ЗУ и АЛУ СЭВМ составят - 193280 л.э., соответственно безотказной работы нерезервированной СЭВМ равна:

$$P_{СЭВМ}(t) = e^{-\sum \lambda(t)t} = e^{-193280 * 10^{-11} t}.$$

Аппаратурные затраты на построение средств обнаружения и коррекции одиночных ошибок в ЗУ, на основе предлагаемого кода, включают: объем памяти для хранения значений 7 проверочных разрядов и значения разряда четности – 48000 л.э.; входное кодирующее устройство ЗУ – 616 л.э. (154 сумматора по mod2); выходное кодирующее устройство ЗУ – 616 л.э.; схему сравнения – 32 л.э.

Для формирования вектора ошибки требуется дешифратор на семь входов. При построении двухступенчатого дешифратора, число двухвходовых схем составит [6]:

$$C_{ДЕШ} = 2^{r_1} + 2^{r_2} + 2^{r_3},$$

где  $r_1 = \frac{r+1}{2}$ ,  $r_2 = \frac{r-1}{2}$ .

В нашем случае аппаратные затраты на построение дешифратора составят 152 л.э.

Для исправления одиночных ошибок корректор должен включать 39 элементов неравнозначности или 156 л.э.

В этом случае, вероятность безотказной работы ЗУ с коррекцией одиночных ошибок составит, с учетом того, что вероятность возникновения одиночной ошибки в ЗУ составляет 0,8 (соответственно вероятность возникновения двойной ошибки и ошибок большей кратности равна 0,2) равна [7,8,9,10]:

$$P_{ВКО}(t) = \{P_{ЗУ}(t)P_{К1}(t) + 0,8[(1-P_{ЗУ}(t)P_{К1}(t))] + 0,8[(1-P_{К1}(t)P_{ЗУ}(t))]P_{К2}(t)P_{СР}(t)P_{ДУ}(t)P_{КОР}(t)\},$$

$P_{К1}(t) = e^{-48616 * 10^{-11} t}$  – вероятность безотказной работы входного кодирующего устройства и аппаратуры для хранения проверочных разрядов;

$P_{К2}(t) = e^{-616 * 10^{-11} t}$  – вероятность безотказной работы выходного кодирующего устройства;

$P_{СР}(t) = e^{-32 * 10^{-11} t}$  – вероятность безотказной работы схемы сравнения;

$P_{ДУ}(t) = e^{-152 * 10^{-11} t}$  – вероятность безотказной работы дешифратора;

$P_{КОР}(t) = e^{-156 * 10^{-11} t}$  – вероятность безотказной работы корректора.

Для обнаружения двойных ошибок используем проверку на четность значений разрядов

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

всего кодового набора. В этом случае для формирования проверки на четность потребуется 38 элементов неравнозначности на кодирование информации, 38 элементов неравнозначности на декодирование информации, 1 элемент неравнозначности для сравнения значений проверочных разрядов на четность, 6000 л.э. – для хранения значений проверочных разрядов в ЗУ, итого 6308 л.э.

Для обеспечения живучести ЗУ при возникновении двойных ошибок и ошибок большей кратности используем дублирование с замещением.

Вероятность безотказной работы дублированного ЗУ, с обнаружением ошибок в каналах предлагаемым кодом равна [7]:

$$PD_{ПК}(t) = (P_{ЗУКО}(t)(2 - P_{ЗУКО}(t))P_{ОБН}P_{П}(t)P_{Ч}(t)),$$

где  $P_{ОБН} = 0,992$  – обнаруживающая способность кода для 32-информационных разрядов;

$P_{Ч}(t) = e^{-6308 \cdot 10^{-11}t}$  – вероятность схемы проверки на четность;

$P_{П}(t)$  – вероятность безотказной работы переключающей схемы. Для каждого канала переключающей схемы потребуется 32 логических элемента И (всего 64 л.э.) и 32-логических элемента ИЛИ, итого 96 л.э.

Для обнаружения ошибок в ЗУ при считывании информации одновременно с прямыми и инверсными выходов (64 выхода) кодом Хемминга, потребуется 7 проверочных разрядов.

**Утверждение 2.** При считывании информации одновременно с прямыми и инверсными выходов ЗУ коррекция одиночной ошибки кодом Хемминга не возможна, так как отказ одного элемента памяти приводит к возникновению двойной ошибки (возникновению ошибок на прямом и инверсном выходах элемента памяти).

Вероятность обнаружения ошибок кодом Хемминга (71,64) составит  $P_{об.Х} = 0,992$ .

Аппаратурные затраты на построение средств обнаружения ошибок, на основе кода Хемминга, включают: объем памяти для хранения значений семи проверочных разрядов – 42000 л.э.; входное кодирующее устройство ЗУ – 820 л.э. (205 сумматора по mod2); выходное кодирующее устройство ЗУ – 820 л.э.; схему сравнения – 28 л.э., элементы ИЛИ – 6 л.э., схему переключения прямых и инверсных выходов ЗУ – 96 л.э., что составляет 43770 л.э.

**Свойство 4.** При использовании кода Хемминга для обнаружения ошибок на прямых и инверсных выходах ЗУ потребуется в два раза больше аппаратуры на кодирование и декодирование информации (без учета проверки на четность кодового набора) и равное количество аппаратуры при модификации предлагаемого кода.

Таким образом, суммарные аппаратурные затраты на построение ЗУ, контролируемого кодом Хемминга, составляют 235770 л.э.

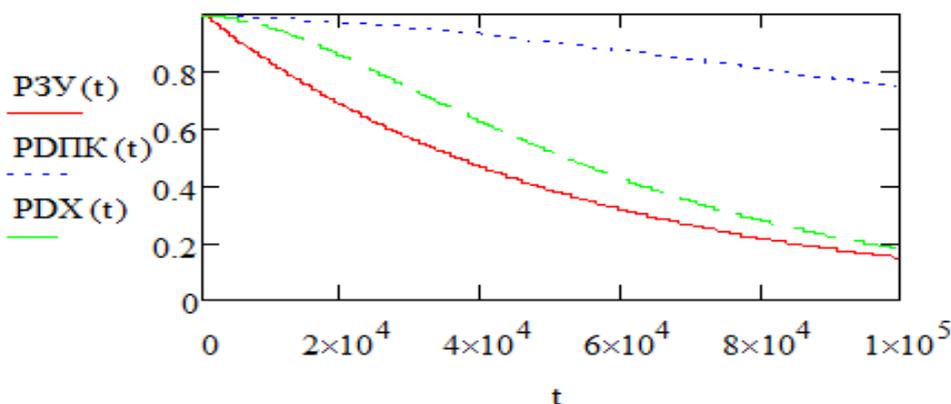
$$P_{ЗУХ}(t) = e^{-\sum \lambda(t)t} = e^{-235770 \cdot 10^{-11}t}.$$

Вероятность безотказной работы дублированного ЗУ, с обнаружением ошибок в каналах кодом Хемминга равна [7]:

$$PD_X(t) = (P_{ЗУХ}(t)(2 - P_{ЗУХ}(t))P_{ОБН}P_{П}(t)).$$

На рисунке 1 представлены графические характеристики вероятностей безотказной работы: резервированного ЗУ; дублированного ЗУ, с обнаружением и коррекцией одиночных ошибок в каналах предлагаемым кодом; дублированного ЗУ с обнаружением ошибок в каналах кодом Хемминга.

При общем резервировании СЭВМ на основе дублирования и обнаружения ошибок в АЛУ каждого канала предлагаемым кодом, каждый из регистров АЛУ дополняется семью элементами памяти. Аппаратурные затраты для хранения проверочных разрядов в четырех регистрах



**Рис. 1.** Графические зависимости вероятностей безотказной работы:  $P_{ЗУ}(t)$  – резервированного ЗУ;  $PD_{ПК}(t)$  – дублированного ЗУ с обнаружением и коррекцией одиночных ошибок в каналах предлагаемым кодом;  $PDX(t)$  – дублированного ЗУ с обнаружением ошибок в каналах кодом Хемминга

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

АЛУ составят 168 л.э. Кроме этого, для обнаружения ошибок непосредственно в АЛУ, требуется кодирующее устройство для формирования поправки к поверочным разрядам – 460 л.э.; схема сложения по mod2 семи проверочных разрядов – 32 л.э., схема переключения содержащая 96 л.э. Аппаратура контроля АЛУ включает 660 л.э. Суммарные аппаратурные затраты на построение контролируемого АЛУ включают 2036 л.э., т.е. вероятность безотказной работы контролируемого АЛУ составит:

$$P_{\text{АЛУК}}(t) = e^{-\sum \lambda(t)t} = e^{-2036 \cdot 10^{-11} t}.$$

Вероятность безотказной работы дублированного АЛУ, с обнаружением ошибок предлагаемым кодом, равна:

$$PD_{\text{АЛУ}}(t) = (P_{\text{АЛУК}}(t)(2 - P_{\text{АЛУК}}(t))).$$

Вероятность безотказной работы АЛУ процессора СЭВМ, резервированной мажоритарным методом равна [6]:

$$P_{\text{МАЛУ}}(t) = (3P_{\text{АЛУ}}(t)^2 - 2P_{\text{АЛУ}}(t)^3)P_{\text{РО}}(t),$$

где  $P_{\text{РО}}(t)$  – вероятность безотказной работы решающего органа. Для коррекции ошибки в одном информационном разряде реализуется функция:

$$y = y^1 y^2 y^3 \bar{v} \bar{y}^1 y^2 y^3 \bar{v} y^1 y^2 y^3 \bar{v} y^1 y^2 y^3 \bar{v},$$

где  $y^i$  – значение информационного разряда по одному из трех каналов. Для 32- информационных разрядов потребуется 352 двухвходовых логических элементов.

На *рисунке 2* представлены графические характеристики вероятностей безотказной работы (при интенсивности отказов л.э  $\lambda = 10^8$  1/ч): нерезервированного АЛУ; дублированного АЛУ, с обнаружением ошибок предлагаемым кодом; АЛУ резервированного мажоритарным методом.

При раздельном резервировании СЭВМ (дублированием ЗУ с обнаружением ошибок в каж-

дом канале кодом Хемминга и мажоритарным резервирование АЛУ процессора) ее вероятность безотказной работы составит:

$$P_{\text{ЭВМП}}(t) = PD_X(t) P_{\text{МАЛУ}}(t).$$

При общем резервировании СЭВМ методом дублирования, с обнаружением ошибок в ЗУ и АЛУ процессора на основе предлагаемого кода, вероятность безотказной работы составит.

$$P_{\text{СЭВМО}}(t) = [P_{\text{ЗУПМ}}(t) P_{\text{АЛУК}}(t) (2 - P_{\text{ЗУПМ}}(t) P_{\text{АЛУК}}(t)) ] P_{\text{ОБН}} P_{\text{П}}(t).$$

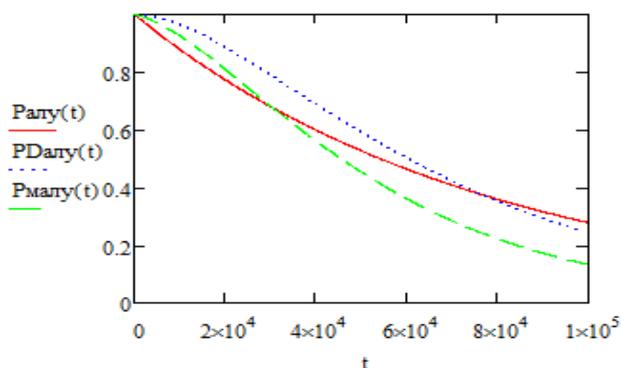
На *рисунке 3* представлены графические характеристики вероятностей безотказной работы: нерезервированной СЭВМ, резервированной мажоритарным методом и методом дублирования с замещением.

### 5. Заключение

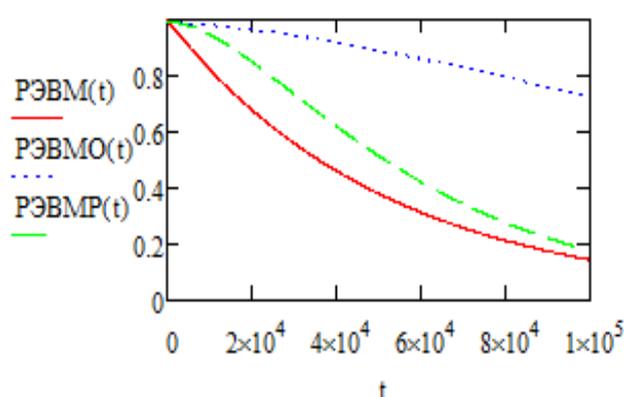
В результате проведенных исследований установлено, что использование предлагаемого кода, при равных аппаратурных затратах с кодом Хемминга, позволяет обнаруживать и корректировать одиночные ошибки при считывании информации с прямых и инверсных выходов ЗУ и обнаруживать двойные ошибки (код Хемминга позволяет только их обнаруживать).

При организации дублирования, предлагаемый код обнаруживает ошибки в АЛУ при выполнении процессорных функций в резервных каналах, что позволяет сократить аппаратурные затраты на 33%, по отношению к мажоритарному методу резервирования.

В результате сравнительной оценки вероятностей безотказной работы дублированной СЭВМ, реализующей общее резервирование с замещением и обнаружением ошибок в резервных каналах на основе предлагаемого кода, с вероятностью безотказной работы СЭВМ, реализующей раздельное резервирование на основе кода Хемминга и мажоритарного метода ре-



**Рис. 2.** Графические зависимости вероятностей безотказной работы:  $P_{\text{ану}}(t)$  – нерезервированного АЛУ;  $PD_{\text{ану}}(t)$  – дублированного АЛУ, с обнаружением ошибок предлагаемым кодом;  $P_{\text{малу}}(t)$  – АЛУ резервированного мажоритарным методом



**Рис. 3.** Вероятности безотказной работы:  $P(t)$  – нерезервированной СЭВМ,  $PM(t)$  – резервированной СЭВМ мажоритарным методом;  $PD(t)$  – резервированной СЭВМ методом дублирования с замещением

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

зервирования, установлено, что предлагаемый метод дублирования позволяет обеспечить выигрыш в вероятности безотказной работы СЭВМ на всем периоде ее эксплуатации.

### Литература

1. ГОСТ 27.003-2016. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. М: ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2018. 19 с.
2. ГОСТ 27.102-2021 Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. М: ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2022. 46 с.
3. Павлов А.А., Романенко Ю.А., Корнеев И.И., Пашаев О.Ф., Макеев М.И., Павлов Ф.А., Романенко А.Ю. Методический аппарат коррекции ошибок при выполнении арифметических операций // Известия Института инженерной физики, 2023. №1(67). С.77-82.
4. Павлов А.А., Павлов А.А., Павлов А.П., Царьков А.Н., Хоруженко О.В. Контроль процессора в автоматизированных измерительных системах // Измерительная техника, 2011. №2. С.12-15.
5. Павлов А.А., Павлов А.А., Павлов П.А., Царьков А.Н., Хоруженко О.В. Метод контроля АЛУ при выполнении арифметических и логических операций // Контроль. Диагностика, 2011. № 3(153). С.48-54.
6. Преснухин Л.Н., Нестеров П.В. Цифровые вычислительные машины. М: Высшая школа, 1981. 511 с.
7. Щербаков Н.С. Самокорректирующиеся дискретные устройства. М.: Машиностроение, 1975. 214 с.
8. Щербаков Н.С. Достоверность работы цифровых устройств. М.: Машиностроение, 1989. 224 с.
9. R. Naseer and J. Draper. Parallel Double Error Correcting Code Design to Mitigate Multi-Bit Upsets in SRAMs // Information Sciences Institute University of Southern California, IEEE Trans Device. Mater 2008. Vol. 6. P.222-225.
10. Prager K., Vahey M., Farwell W., Whitney J., Lieb J. A fault tolerant signal processing computer // Dependable Systems and Networks, 2000. DSN 2000. Proceedings International Conference on. 2000. P.169-174.

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.056

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РЕФРАКЦИИ ЭМ-ВОЛН В ТРОПОСФЕРЕ И РЕЛЬЕФА ТРАССЫ НА ЗАТУХАНИЕ ЭМ-ВОЛН И ВЕРОЯТНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ ЗАЩИЩАЕМОГО ОБЪЕКТА ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF EM WAVE REFRACTION IN THE TROPOSPHERE AND THE PATH TOPOGRAPHY ON THE ATTENUATION OF EM WAVES AND THE PROBABILITY OF DETECTING A PROTECTED OBJECT



Елена Павловна Бутрина

начальник ОСПО

АНО «Институт инженерной физики»

Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,

Большой Ударный переулок, д. 1а

Тел.: +7 (916) 245-98-82

E-mail: kenga48@yandex.ru

### Аннотация

Статья посвящена разработке математической модели, позволяющей достичь более точного соответствия теоретических расчетов распространения ЭМ-волн и результатов практических измерений зон видимости защищаемых объектов за счет более подробной оценки рефракции ЭМ-волн в тропосфере и влияния рельефа трассы на затухание ЭМ-волн, а также влияния этих факторов на вероятность обнаружения защищаемого объекта предполагаемым противником.

**Ключевые слова:** защищенность объекта, угроза, уязвимость, ЭМ-волны.

### Summary

The article is devoted to the development of a mathematical model that makes it possible to achieve a more accurate correspondence between theoretical calculations of the propagation of EM waves and the results of practical measurements of visibility zones of protected objects through a more detailed assessment of the refraction of EM waves in the troposphere and the influence of the path topography on the attenuation of EM waves, as well as the influence of these factors on the probability of detection of the protected object by the intended enemy.

**Keywords:** object security, threat, vulnerability, EM waves.

Важной задачей является достижение более точного соответствия теоретических расчетов распространения ЭМ-волн и результатов практических измерений зон видимости защищаемых объектов. Актуальность подобных задач обусловлена возросшими возможностями ведения несанкционированной съемки и наблюдения с использованием личных видеозаписывающих устройств (смартфонов, планшетов), оптико-электронной аппаратуры (фотоаппаратов, биноклей и т.д.), МБПЛА. Ниже будет рассмотрена математическая модель, представляющая возможность повысить такое соответствие за счет более адекватной оценки рефракции ЭМ-волн в тропосфере и влияния рельефа трассы на затухание ЭМ-волн, а также влияния этих факторов на вероятность обнаружения защищаемого объекта предполагаемым противником.

В рамках разрабатываемой модели будем считать, что и объект защиты, и средство наблюдения находятся в пределах тропосферы (не выше 15 км над уровнем моря (то есть, рассматриваются только трассы земля-земля и земля-воздух)). В зависимости от поставленной задачи требуется определить либо расстояние по земле, начиная с которого объект может быть обнаружен средством наблюдения (предельная дальность обнаружения), либо слепую зону (область пространства, из которой средство наблюдения не может обнаружить объект, *рисунок 1*).

При прогнозировании и оценке видимости объекта необходимо учитывать высотный профиль трассы, являющийся одним из основных искажающих факторов при распространении ЭМ-волн оптического и инфракрасного диапазонов. Ведение наблюдения посредством фик-

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

сации отраженного излучения в данном случае невозможно. Резкие перепады высот образуют естественные экраны, оценка зон видимости объекта для таких трасс с использованием и без использования карт высот дает принципиально отличающиеся результаты.

При работе с наземными объектами необходимо учитывать не только изменения рельефа, но и препятствия – как естественные, так и искусственно созданные (растительность, зеленые насаждения, здания, ограждения и т.д.).

Основное влияние среды на распространение электромагнитных (ЭМ) волн в атмосфере – это их преломление, или рефракция. В результате увеличивается геометрическое расстояние, которое луч проходит между точками излучения и приема, а также углы, под которыми излучение приходит к объектам (или уходит от них). Поэтому рефракция ЭМ-волн весомо влияет на предельные дальности обнаружения, пусть и в гораздо меньшей степени, чем рельеф.

Рефракцию ЭМ волн как искажающий фактор учитывают и при решении широкого круга задач локации, геодезии, навигации.

Полный расчет траектории волны при наличии рефракции зависит от многих параметров,

поэтому для расчетов часто используют упрощенные модели. Например, принимается верным утверждение, что волна является плоской и распространяется прямолинейно. Тогда для «видимости» объекта должно выполняться условие — объект и средство наблюдения находятся на одной прямой, которая не пересекает никакие препятствия. Из точки N (точка расположения объекта) проводится касательная к Земле (линия горизонта), где M – точка касания. Условие видимости будет нарушено, если наблюдатель находится ниже прямой NM (рисунк 2, серая зона).

Расстояние до геометрического горизонта определяется следующим образом:

$$NM \text{ [км]} = \sqrt{(R_z + \Delta h_N)^2 - R_z^2} \cong 3,57 \cdot \sqrt{\Delta h_N} \quad (1)$$

где  $\Delta h_N$  – высота расположения объекта над уровнем моря [км];

$R_z = 6371$  км – радиус Земли.

Средство наблюдения располагается в точке L, на высоте  $\Delta h_L$  над уровнем моря (рисунк 3).

$$NL \text{ [км]} \cong 3,57 \cdot \sqrt{\Delta h_N} \quad (2)$$

$$NL_0 \text{ [км]} = 3,57 \cdot (\sqrt{\Delta h_N} + \sqrt{\Delta h_L}) \quad (3)$$

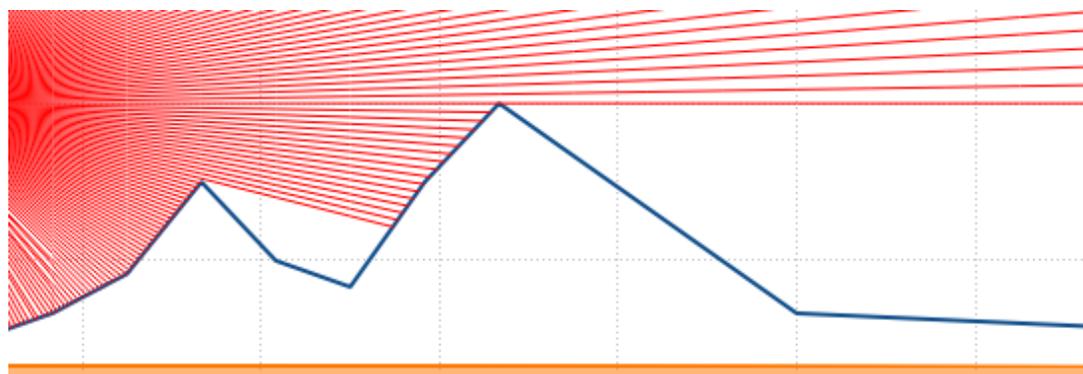


Рис. 1. Слепые зоны с учетом высотного профиля трассы

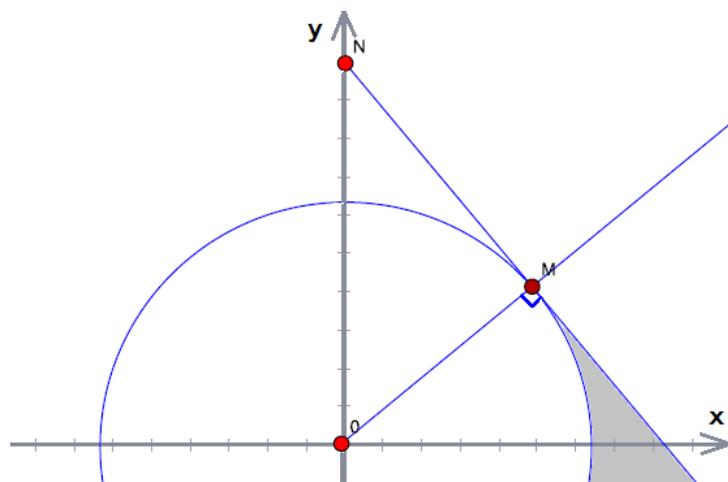


Рис. 2. Дальность видимого горизонта

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Условие видимости объекта нарушается, если  $NL > NL_0$ .

Простейший способ учета земной рефракции – введение поправки в числовой коэффициент формулы (3). Обычно принимается, что он больше на  $k\%$ . Например, в морских условиях принимается  $k=8\%$  [1]. Тогда для дальности прямой видимости с учетом рефракции получаем выражение:

$$NL_0 [\text{км}] = 3,86 \cdot (\sqrt{\Delta h_N} + \sqrt{\Delta h_L}) \quad (4)$$

В радиолокации этот коэффициент равен 4,12 (что соответствует «эквивалентному» радиусу Земли  $R_э = 8\,500$  км). Обычно принимается, что расстояние до видимого горизонта  $NM$  с учетом рефракции изменяется в диапазоне  $(NM \cdot 0,9; NM \cdot 1,1)$ .

Формула (4) дает неточные результаты, так как рефракция в ней представлена в виде постоянного коэффициента, не зависящего от многих параметров – температуры, давления, длины ЭМ-волны и пр. Такая погрешность является существенной и может в значительной мере повлиять на результаты вычислений, в частности, на оценку предельной дальности обнаружения объекта.

Основным фактором при описании прелом-

ляющих свойств атмосферы для длин волн видимого (0,38-0,74 мкм) и инфракрасного (0,74-20 мкм, ближний и средний ИК-диапазоны) диапазонов является изменение коэффициента преломления воздуха во времени и в пространстве. Этот коэффициент зависит от температуры, давления, влажности и длины волны. Согласно данным метеорологических исследований вертикальные градиенты этих метеовеличин значительно превосходят горизонтальные. Поэтому в теории рефракции наибольшее распространение получила сферически-слоистая модель атмосферы.

### Моделирование процесса распространения ЭМ-волн в инфракрасном и оптическом диапазонах

В рамках модели будем считать объект материальной точкой, расположенной на известной высоте  $\Delta h_N$  над уровнем моря. Относительно точки расположения объекта выбирается ряд направлений с шагом  $\varphi \in (0^\circ; 360^\circ)$  (рисунк 4). Чем больше направлений будет выбрано, тем более точными будут результаты.

Для каждого из направлений расчеты производятся в двумерной системе координат, построенной в плоскости, проходящей через центр

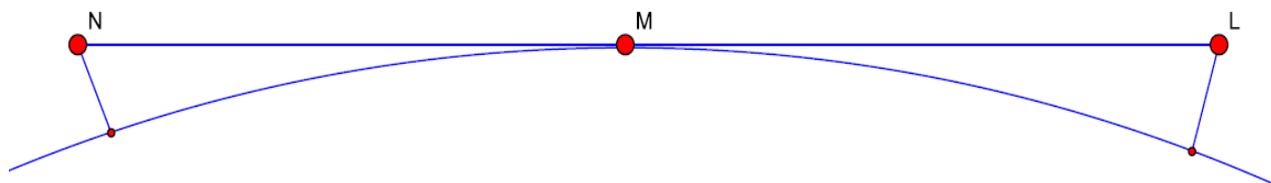


Рис. 3. Дальность прямой видимости объекта

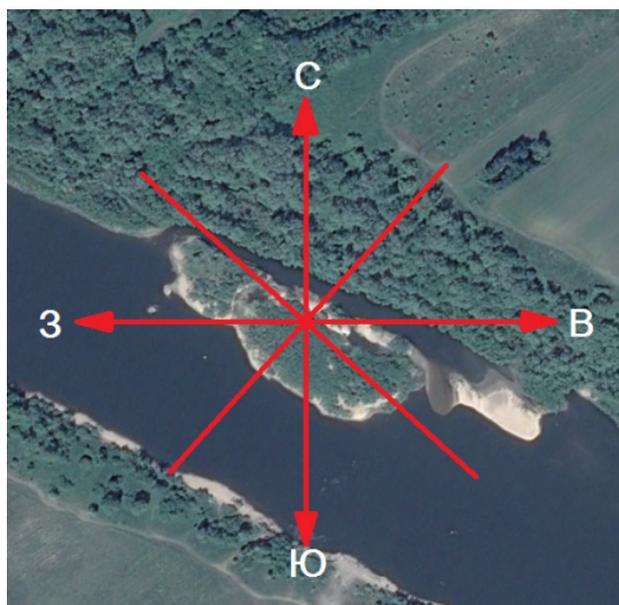


Рис. 4. Выбор направлений наблюдения относительно объекта

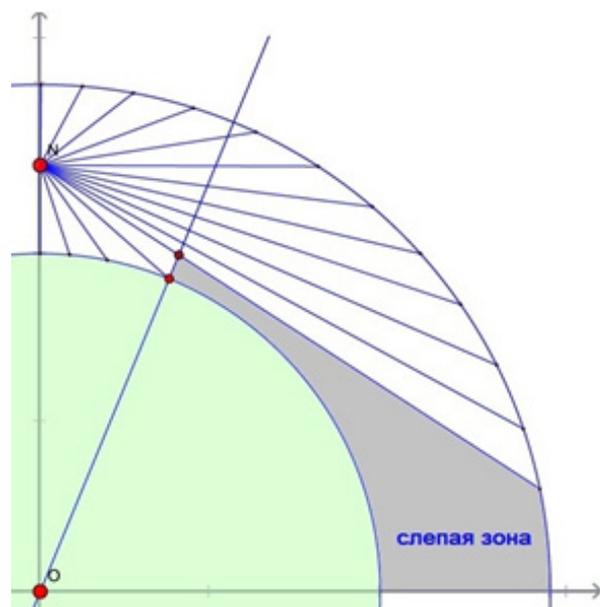


Рис. 5. Траектории распространения волны, построенные из точки

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Земли  $O$ , объект защиты  $N$  и наблюдателя  $L$ . Начало системы координат находится в центре Земли. Сечение Земли есть окружность радиусом  $R_3 = 6371$  км. Верхняя граница тропосферы представляет собой концентрическую относительно земной поверхности окружность радиусом  $R_t = R_3 + 15$  км. Объект наблюдения расположен в точке  $N$  на оси  $OY$ ,  $ON = R_3 + \Delta h_N$ . Из точки расположения объекта  $N$  с шагом  $\alpha \in (-90^\circ; 90^\circ)$  относительно оси  $OX$  строятся траектории распространения волны с известной  $\lambda$  о их пересечения с поверхностью Земли, верхней границей тропосферы, рельефом или объектами на рельефе. Область, в которой распространяются построенные траектории – видимая (рисунк 5). Траектории, касающиеся Земли, являются границами, а области, расположенные ниже них, представляют собой слепые зоны.

В настоящее время для решения схожих задач реализуются следующие подходы к учету рефракции:

- рефракция игнорируется;
- вводится поправочный коэффициент, вычисленный для стандартных начальных условий;
- выводится уравнение кривой, ограничивающей «слепую зону».

Каждый из этих подходов имеет серьезные недочеты. Расстояние до видимого горизонта с учетом рефракции может быть скорректировано более чем на 10%, следовательно, игнорировать данный фактор нельзя. Использование однажды вычисленного поправочного коэффициента не дает объективной картины. Вывод уравнения кривой, ограничивающей слепую зону также затруднителен, не только из-за большого числа входных параметров, но и по той причине, что начальное положение средства наблюдения относительно объекта часто неизвестно.

Принципиальное отличие предложенного подхода состоит в том, что с использованием численных методов из точки расположения объекта наблюдения строится множество возможных траекторий распространения сигнала в различных направлениях. Таким образом решается проблема неизвестного расположения средства наблюдения. По сути, для каждого из направлений теперь необходимо построить траектории волн, выпущенных под известным углом.

Проблему вычисления рефракции по данным метеоизмерений можно разбить на две задачи – задачу Снелла и задачу Ферма. В задаче Снелла предполагается, что траектория луча уже известна, т.е. заданы видимый угол места источника излучения и высотный профиль коэффициента преломления воздуха, по которым

и вычисляется рефракция в соответствии с законом преломления Снелла.

В задаче Ферма определяется траектория, связывающая точки приема и излучения, по истинным координатам этих точек и высотному профилю коэффициента преломления воздуха, т.е. определяется угол места, под которым из точки приема видна точка излучения.

Построение траектории ЭМ-волны с известным углом места источника излучения избавляет нас от необходимости решать задачу Ферма, требующей знания координат точек излучения и приема, в конечном итоге все сводится к решению задачи Снелла, что значительно упрощает вычисления.

### Выбор модели атмосферы

Наиболее известны два принципиально разных подхода [5].

В первом из них предполагается, что высотный профиль коэффициента преломления воздуха  $n(h)$  состоит из слоев воздуха с постоянным значением  $n$  внутри слоя. В каждом слое луч распространяется по прямой, преломление происходит только на его границах.

При втором подходе профиль коэффициента преломления воздуха  $n(h)$  представляется в виде кусочно-линейной функции, узлы которой совпадают с высотами радиозондирования. В этом случае искривление луча происходит только внутри слоя без преломления на его границах. В каждом слое луч распространяется по кривой, близкой к дуге окружности, радиус которой зависит от градиента коэффициента преломления воздуха в слое. Интеграл рефракции может быть приближенно вычислен в каждом слое, а искривление всей траектории получают суммированием отдельных искривлений.

Воспользуемся первым подходом. Предположим, что атмосфера состоит из сферических слоев, концентрических с поверхностью сферической Земли. Для каждого уровня вычисляется коэффициент преломления воздуха  $n(h)$ .

В качестве основного аргумента против использования данной модели приводится утверждение о том, что если для оценки рефракции в реальных условиях используются данные радиозондирования атмосферы, то толщина слоя может достигать нескольких километров, поэтому в данном случае модель позволяет получить только грубые оценки искривления траектории луча. Однако, установив зависимость коэффициента преломления от высоты над уровнем моря, можно установить сколь угодно малую толщину слоя, что позволит обеспечить высокую точность полученных результатов.

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

### Установление зависимости коэффициента рефракции от входных параметров (температуры и давления окружающей среды, длины волны, высоты над уровнем моря)

Толщину слоя для модели установим следующим образом. В положительном направлении оси OX, на поверхности Земли выберем ряд точек. Расстояние  $D_i$  до  $i$ -той точки изменяется с шагом  $D_{step}$ :  $D_i = i \cdot D_{Step}$ .

Из точки начала координат через точку  $i$  построим нормаль к поверхности Земли. Из точки N расположения объекта траектория строится под известным углом  $\alpha$  к направлению OX. В точке пересечения траектории волны с нормалью проходит граница слоя. После чего траектория достраивается до пересечения со следующей нормалью и т.д. (рисунком 6).

Преломление траектории ЭМ-волны на границе раздела двух сред для волн видимого и инфракрасного диапазонов описывается при помощи закона Снелла [4]:

$$\frac{\sin \beta_2}{\sin \beta_1} = \frac{n_1}{n_2}, \quad (5)$$

где  $\beta_1$  – угол падения,  $\beta_2$  – угол преломления,  $n_1$  и  $n_2$  – коэффициенты преломления сред.

Для дальнейшего построения траектории волны необходимо и достаточно вычислить  $\beta_2$ . Из (5) получим:

$$\beta_2 = \arcsin \frac{n_1 \cdot \sin \beta_1}{n_2} \quad (6)$$

Найдем коэффициенты преломления  $n_1$  и  $n_2$ . Зависимость коэффициента преломления среды от длины волны описывается эмпирической формулой Коши [2]:

$$n = a + \frac{b}{\lambda^2} + \frac{c}{\lambda^4}, \quad (7)$$

где  $\lambda$ , мкм – длина волны в вакууме;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – постоянные, значения которых подбираются эмпирически. В большинстве случаев ограничиваются двумя первыми членами ряда. При наличии метеорологических данных вместо  $a$  и  $b$  используют эмпирически подобранные коэффициенты:

$$n - 1 = 10^{-6} \cdot \left( \frac{77,6 \cdot P}{T} + \frac{0,584 \cdot P}{T \cdot \lambda^2} \right), \quad (8)$$

где  $P$  – давление в слое в гектопаскалях,  $T$  – температура слоя в кельвинах,  $\lambda$  – длина волны в микрометрах. Формула справедлива для ЭМ-волн видимого и инфракрасного диапазонов с  $\lambda \in (0,2; 20)$  мкм.

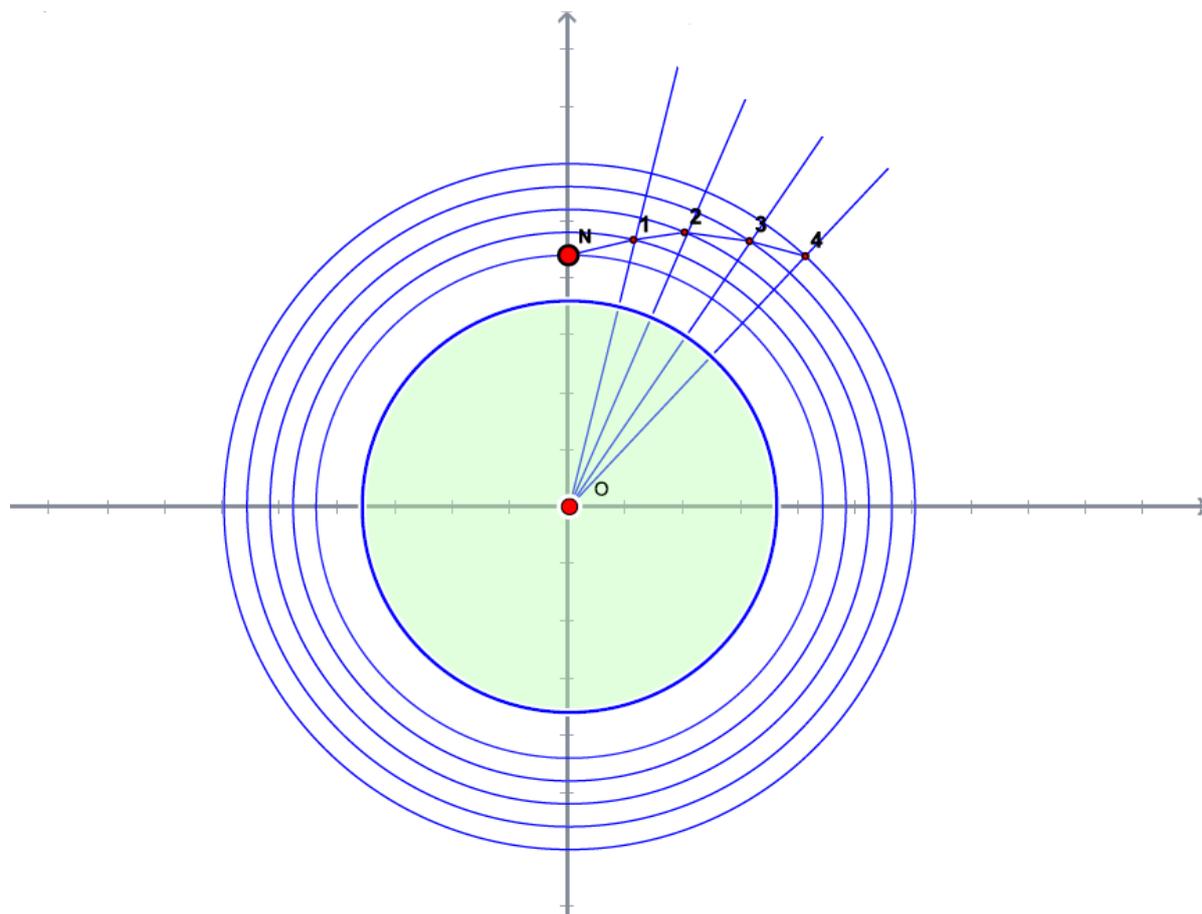


Рис. 6. Схема траектории волны и границы слоя на поверхности Земли

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Т и Р в начальной точке N известны. Для дальнейших расчетов необходимо установить зависимость Т и Р от изменения высоты точки над уровнем моря.

$$n-1=10^{-6} \cdot \left( \frac{77,6 \cdot (P_{\text{start}} - (\Delta h - h_{\text{start}}) \cdot P_{\text{change}})}{T_{\text{start}} - (\Delta h - h_{\text{start}}) \cdot T_{\text{change}}} + \frac{0,584 \cdot (P_{\text{start}} - (\Delta h - h_{\text{start}}) \cdot P_{\text{change}})}{(T_{\text{start}} - (\Delta h - h_{\text{start}}) \cdot T_{\text{change}}) \cdot \lambda^2} \right) \quad (9)$$

где  $P_{\text{start}}$  – давление в начальной точке N [гПа],  $T_{\text{start}}$  – температура в начальной точке [К],  $P_{\text{change}}$  – изменение Р на единицу высоты,  $T_{\text{change}}$  – изменение Т на единицу высоты,  $\Delta h$  – высота точки траектории над уровнем моря [км],  $h_{\text{start}}$  – высота начальной точки,  $\lambda$  – длина волны [мкм].

Очевидна необходимость установления ряда параметров по умолчанию, т.к. исходные данные для расчетов не всегда достигают необходимого уровня детализации.

Используем следующую зависимость [3]:

- с увеличением высоты Р уменьшается на 12 кПа/км;

- с увеличением высоты Т уменьшается на 5,5 К/км.

$$n-1=10^{-6} \cdot \left( \frac{77,6 \cdot (P_{\text{start}} - (\Delta h - h_{\text{start}}) \cdot 120)}{T_{\text{start}} - (\Delta h - h_{\text{start}}) \cdot 5,5} + \frac{0,584 \cdot (P_{\text{start}} - (\Delta h - h_{\text{start}}) \cdot 120)}{(T_{\text{start}} - (\Delta h - h_{\text{start}}) \cdot 5,5) \cdot \lambda^2} \right) \quad (10)$$

При известных  $h_{\text{start}}$ ,  $\Delta h$ ,  $T_{\text{start}}$ ,  $P_{\text{start}}$  и  $\lambda$  по формуле (10) можем вычислить  $n_1$  и  $n_2$ .

Модель предполагает равномерное изменение Т и Р с высотой, что, конечно, не соответствует действительности, однако позволяет оценить рефракцию, и, как следствие, изменение траектории ЭМ-волны более точно, чем модель, предполагающая постоянную температуру во всей среде.

Для более точных расчетов в каждой конкретной ситуации можно использовать другие способы назначения/вычисления Т и Р. Например:

- задавать иную зависимость Т и Р относительно высоты над уровнем моря (например, при наличии температурных карт или радиозондовых данных);

- задавать значение Т и Р как константу для слоя, отдельного сектора, сегмента сектора или нескольких объединенных сегментов сектора (рисунк 7 (а-г));

- задавать Т и Р как градиент от изменения высоты, используя в качестве стартовых и конечных значений Т и Р на верхней и нижней гра-

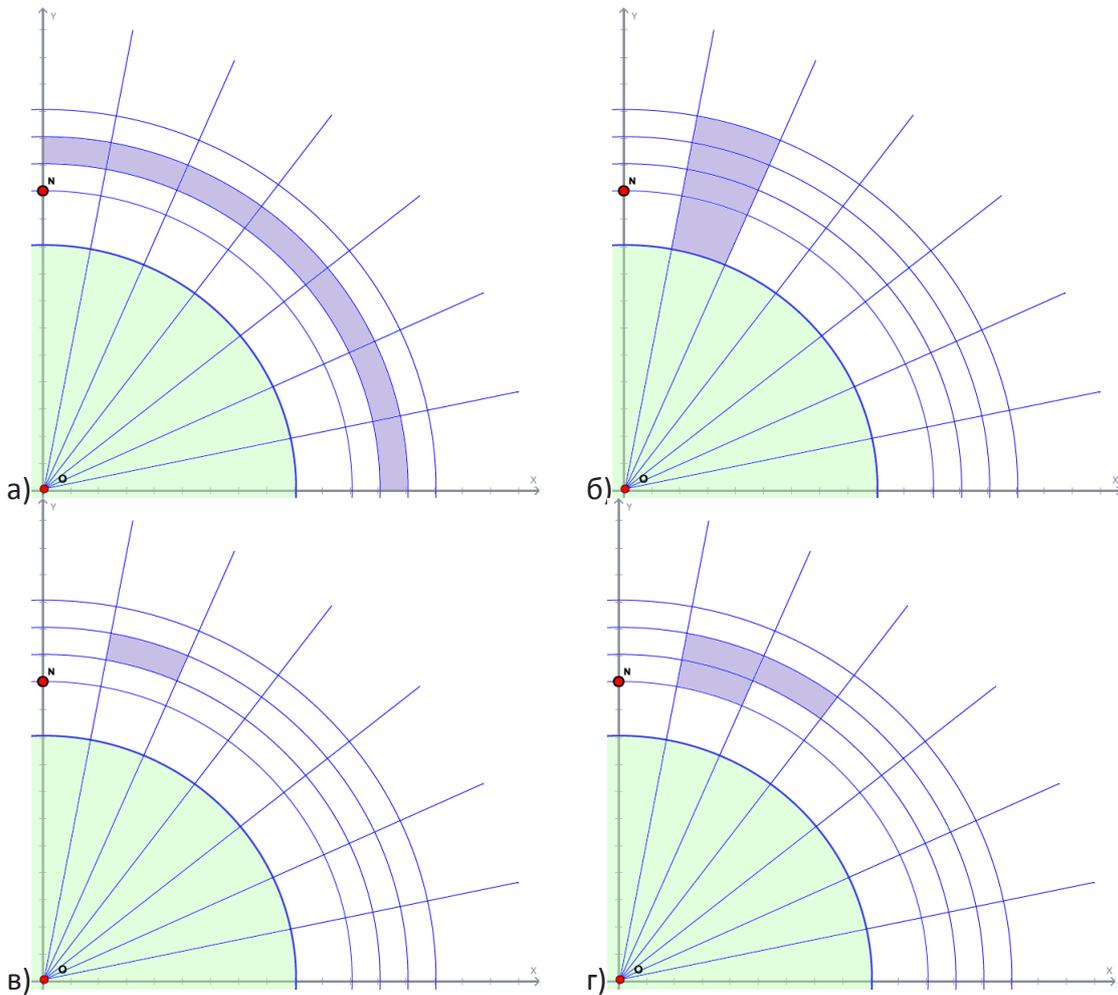


Рис. 7. а) слой; б) сектор; в) сегмент сектора; г) несколько объединенных сегментов сектора

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ницах отдельного сектора, сегмента сектора или нескольких объединенных сегментов сектора.

Подобный подход позволяет более гибко подходить к решению поставленных задач. То есть, модель работает уже при минимальном наборе входных параметров, однако (без изменения общего алгоритма расчета) возможно использование температурных карт или данных радиозондов.

### Учет высотного профиля трассы

Как уже было упомянуто выше, при работе с ЭМ-волнами оптического и инфракрасного диапазонов изменения рельефа являются одним из основных искажающих факторов, т.к. резкие перепады высот образуют естественные экраны.

В рамках предложенной модели для каждого из направлений строится высотный профиль трассы «объект-средство наблюдения». На каждом участке построения отдельной траектории проверяется факт ее пересечения с рельефом. Если траектория пересекает рельеф – дальнейшие построения для данной траектории прекращаются.

### Проведение экспериментальных исследований для проверки эффективности разработанной модели

Для более удобного тестирования данной модели была разработана программа расчета слепых зон. Для разработки программы использо-

вались следующие средства:

- язык программирования C++;
- Qt 5.7.0 – библиотека для разработки ПО на C++;
- интегрированная среда разработки Qt Creator 4.1.0.

В качестве исходных данных пользователю необходимо ввести температуру и давление в точке N расположения объекта, высоту  $\Delta h_{\text{start}}$  точки N над уровнем моря, длину волны  $\lambda$ , желаемый шаг по D и  $\alpha$ . Карту высот на выбранное направление можно загрузить из файла или заполнить самостоятельно. Реализованы возможности добавления объекта-препятствия на выбранном расстоянии D и задания собственной зависимости T и P относительно высоты над уровнем моря. В результате расчета для каждого из направлений наблюдения получаем кривую, ограничивающую слепую зону, также есть возможность сравнить дальности  $D_{\text{hor}}$  геометрического горизонта и максимальные дальности видимости  $D_{\text{max}}$  с учетом и без учета рефракции.

Интерфейс программы представлен на рисунке 8.

#### 1. Изменение слепых зон из-за рефракции.

В результате тестирования модели было установлено, что рефракция существенно влияет на изменение слепых зон как для волн оптического, так и инфракрасного диапазонов. Изменение дальности до горизонта  $D_{\text{hor}}$  с учетом рефракции при различных стартовых параметрах составляет 15-30%, что соответствует теоретической оценке и экспериментальным данным (в открытой печати [ссылка на источник]). Кроме того, рефракция в значительной мере влияет на максимальную дальность видимости  $D_{\text{max}}$ . Изменение  $D_{\text{max}}$  влияет на изменение слепых зон в верхних слоях тропосферы, что важно в случаях наблюдения с воздуха (самолеты, БПЛА). Примеры изменения слепых зон вследствие учета рефракции представлены ниже.

Увеличение дальности  $D_{\text{hor}}$  геометрического горизонта.

1.1. Исходные параметры: T = 20 °C, P = 746 мм. рт. ст.,  $\Delta h_{\text{start}} = 1$  км, шаг по  $\alpha = 1^\circ$ , шаг по D = 250 м,  $\lambda = 10$  мкм.

Результат:  $D_{\text{hor}}$  без учета рефракции – 112,88 км,  $D_{\text{hor}}$  с учетом рефракции 130,56 км,

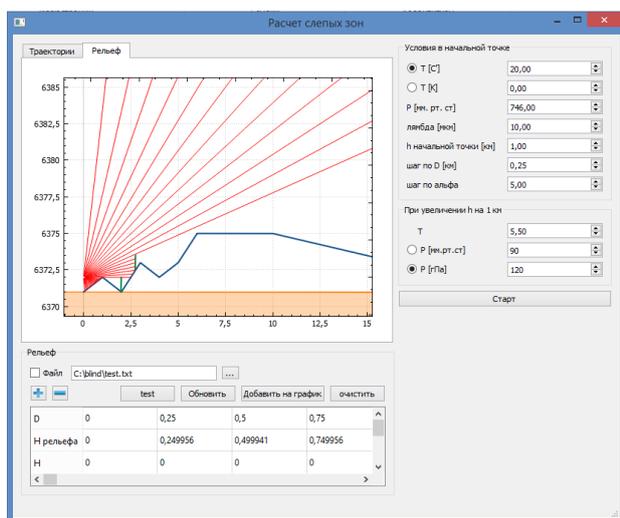


Рис. 8. Интерфейс программы

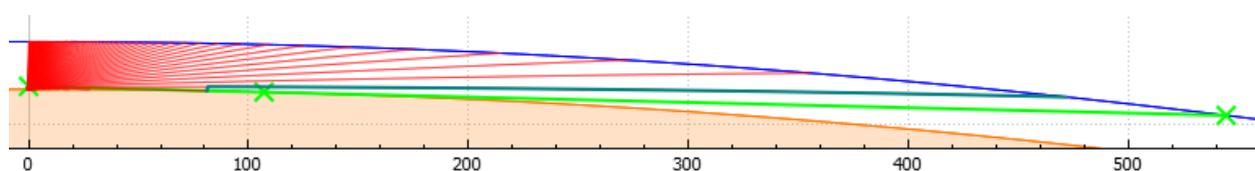


Рис. 9. Уменьшение дальности  $D_{\text{hor}}$  геометрического горизонта

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

что означает увеличение  $D_{\text{hor}}$  на 15,7%. Часть зон, при расчетах без учета рефракции считавшихся слепыми (т.е. защищенными) являются видимыми.

1.2. Уменьшение дальности  $D_{\text{hor}}$  геометрического горизонта (рисунк 9).

Исходные параметры:  $T=20^\circ\text{C}$ ,  $P=746$  мм. рт. ст.,  $\Delta h_{\text{start}}=0,9$  км, шаг по  $\alpha=1^\circ$ , шаг по  $D=250$  м,  $\lambda=0,7$  мкм.

Результат:  $D_{\text{hor}}$  без учета рефракции – 107,09 км,  $D_{\text{hor}}$  с учетом рефракции 81,12 км (уменьшение  $D_{\text{hor}}$  на 24,25%). Часть зон, при расчетах без учета рефракции считавшихся видимыми находятся в слепой зоне (защищены).

1.3. Уменьшение  $D_{\text{max}}$  на пересечении с тропосферой (рисунк 10).

Исходные параметры:  $T=20^\circ\text{C}$ ,  $P=746$  мм. рт. ст.,  $\Delta h_{\text{start}}=1$  км, шаг по  $\alpha=1^\circ$ , шаг по  $D=250$  м,  $\lambda=10$  мкм.

Результат:  $D_{\text{max}}$  без учета рефракции – 549,66 км, с учетом рефракции 468,42 км (уменьшение  $D_{\text{max}}$  на 14,8%).

Полученные данные требуют дальнейшего экспериментального подтверждения. Однако очевидно, что без учета рефракции погрешность вычислений велика, поэтому нельзя не учитывать фактор рефракции при оценке слепых зон.

### 2. Изменения из-за рельефа и объектов.

Изменения слепых зон, возникающие при учете рельефа поверхности, являются наиболее значительными. Величина изменений зависит от конкретных исходных данных. Очевидно, что наиболее серьезные изменения возникают на трассах с резкими перепадами высот (горные районы). При расчетах слепых зон на равнинных участках большее значение имеет рефракция. Кроме того, большое значение также имеют препятствия, не являющиеся частью рельефа (зда-

ния, заграждения и т.д.). Схематичное изображение зон видимости/слепых зон с учетом и без учета рельефа представлено на рисунках 9 и 10.

Исходные параметры:  $T=20^\circ\text{C}$ ,  $P=746$  мм. рт. ст.,  $\Delta h_{\text{start}}=1$  км, шаг по  $\alpha=1^\circ$ , шаг по  $D=250$  м,  $\lambda=10$  мкм. Высотный профиль трассы (см. таблицу 1).

На расстоянии  $D=0,75$  км расположен объект высотой 0,2 км, на расстоянии  $D=2,5$  км расположен объект высотой 0,3 км. В случае, когда рельеф местности не учитывается, объектов на трассе нет.

Сравним слепые зоны на расстояниях  $D \in (0; 5)$  км от точки расположения объекта наблюдения и высотах  $h \in (0; 6)$  км над уровнем моря.

Согласно полученным результатам, можно сделать вывод, что изменение рельефа поверхности является одним из основных факторов, влияющих на величину и расположение слепых зон, что необходимо учитывать в расчетах. В дальнейшем также необходимо экспериментальное подтверждение полученных данных.

### Литература

1. Рульков Д. И. Навигация и лоция. М.: Транспорт, 1973. 232 с.
2. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы, 1984. 752 с.
3. Зинина М.В. Особенности распространения радиоволн в тропосферном волноводе. Том 1. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011.
4. Литвинов О.С., Горелик В.С. Электромагнитные волны и оптика: учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2006. 446 с.
5. Паршуков В.А. Влияние рефракции миллиметровых и сантиметровых волн в атмосфере на угол места источника излучения: дисс. канд. физ.-мат. наук. М.: 2004. 171 с.

Таблица 1

D, км	0	1	2	3	4	5
С учетом рельефа						
$\Delta h_1$ , км	0,2	1	0,5	2	1	2
Без учета рельефа						
$\Delta h_2$ , км	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

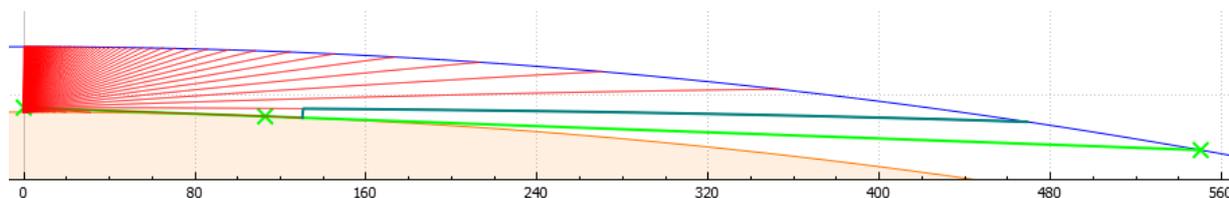


Рис. 10. Уменьшение  $D_{\text{max}}$  на пересечении с тропосферой

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 621.396

## МОДЕЛЬ УГРОЗ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СИСТЕМЫ ОТСЛЕЖИВАНИЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ ДЛЯ РАЗВИВАЮЩИХСЯ РЫНКОВ INFORMATION SECURITY THREAT MODEL FOR PRODUCT QUALITY TRACKING SYSTEMS FOR EMERGING MARKETS



**Алексей Николаевич Бегаев**

кандидат технических наук  
генеральный директор АО «Эшелон – Северо-Запад»  
Адрес: 199178, Санкт-Петербург,  
ул. Набережная реки Смоленки, д.14  
Тел.: +7 (812) 635-89-04  
e-mail: mail@nwechelon.ru

**Игорь Иванович Комаров**

кандидат физико-математических наук, доцент  
доцент факультета  
безопасности информационных технологий  
Университет ИТМО  
Адрес: 197101, Санкт-Петербург,  
Кронверкский пр., д. 49, лит. А  
Тел.: +7 (812) 480-00-00  
e-mail: od@itmo.ru

**Ван Хиеу Лэ**

аспирант факультета  
безопасности информационных технологий  
Университет ИТМО  
Адрес: 197101, Санкт-Петербург,  
Кронверкский пр., д. 49, лит. А  
Тел.: +7 (812) 480-00-00  
E-mail: od@itmo.ru

### Аннотация

В работе приводятся результаты формализованного анализа угроз информационной безопасности систем прослеживаемости качества товаров, ориентированных на развивающиеся рынки. Спецификами таких систем являются: гетерогенность и существенное ограничение доступных вычислительных ресурсов, частичная децентрализация, динамический и слабо структурированный состав контрагентов. Полученные результаты обеспечивают формирование исходных данных для проектирования прикладных систем с использованием рискованных моделей управления информационной безопасностью, а также создают обоснованные предпосылки для формирования национальной нормативной базы развивающихся стран по автоматизированному учету деятельности в лицензируемых областях.

**Ключевые слова:** кибербезопасность, формализация бизнес-процессов, формализованное моделирование угроз, управление рисками информационной безопасности, удовлетворенность причастной стороны.

### Summary

The paper presents the results of a formalized analysis of information security threats for goods quality traceability systems aimed at emerging markets. The specifics of such systems are heterogeneity and significant limitation of available computing resources, partial decentralization, dynamic and poorly structured composition of counterparties. The obtained results provide the initial data formation for the design of application systems using information security risk management models, also create reasonable prerequisites for developing countries national regulatory framework formation for licensed areas automated accounting of activities.

**Keywords:** cybersecurity, business processes formalization, formalized threat modeling, information security risk management, stakeholder satisfaction.

### Введение

Практическая реализация систем отслеживания оборота и качества продукции (СОКП) имеет несколько ключевых задач государственного уровня [1] и, связанных с ними, косвенных положительных эффектов, обеспечивающих устойчивое развитие хозяйствующих субъектов, осуществляющих деятельность в регулируемых отраслях.

С точки зрения хозяйствующих субъектов к

числу основных положительных эффектов следует отнести: упрощение процедуры лицензирования и непрерывного контроля их деятельности со стороны регулирующих органов, доказательность процедуры оценки репутации и формирование положительного имиджа на рынке, приверженность потребителя и привлечение новых клиентов на основании механизмов сетевого эффекта<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Сетевой эффект – закономерность экономики, определяющая взаимосвязь между ценностью товаров (услуг) и размером клиентской базы. Имеет прямую и обратную интерпретацию: увеличение числа клиентов – повышает ценность товаров, и наоборот – повышение ценности товаров (услуг) влечет увеличение числа клиентов.

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Более того, современное понимание роли и места кибербезопасности естественным образом определяет одной из основных задач эффективное управление «...непрерывным функционированием и восстановлением систем...» [2], что требует глубокого погружения специалиста по информационной безопасности в прикладные области целевой системы.

Вместе с тем, практика успешной разработки и эксплуатации таких систем позволяет определить типовые характеристики и требования к их структуре и бизнес-процессам. Так, успешно применяемые в Российской Федерации системы ЕГАИС<sup>2</sup> и ГИС МТ<sup>3</sup>, предполагают, определяемые на ранних<sup>4</sup> стадиях разработки:

- государственное регулирование процессов создания функционирования систем;
- наличие единого центрального оператора;
- централизованную иерархическую структуру;
- жесткие функциональные и технические требования к технологическим компонентам;
- требования по информационной доступности функциональных компонентов и, связанные с этим, требования к качеству каналов связи;
- однозначно и строго определенные требования к методам и средствам обеспечения основных характеристик информационной безопасности, в том числе по использованию сертифицированных программных, аппаратных и криптографических средств.

В отличие от развитых стран развивающиеся экономики не в полной мере могут обеспечить выполнение указанных требований, как в силу технологического отставания, так и в силу противоречивости национального законодательства. Поэтому для них является актуальной задача разработки аналогичных по целевому назначению и основной функциональности систем с использованием существующих ресурсов, возможно с некоторым снижением качества реализации вспомогательных функций. Однако неконтролируемое снижение показателей кибербезопасности может привести к дискредитации самого подхода и недостижению целей создания СОКП. Поэтому разработка концепции их построения должна в первую очередь базироваться на модели и технологиях информационной безопасности, обеспечивающих конфиденциальность, целостность и неотказуемость информационных процессов с возможным снижением

требований по доступности (оперативности). В таком случае целевая информационная система будет иметь предпосылки для эволюционного развития по мере совершенствования технологической и нормативно-правовой базы.

### Предпосылки исследования

Предпосылки настоящего исследования разделяются на две группы:

- технико-экономические потребности Социалистической Республики Вьетнам (СРВ) в регулировании рыбопромышленного комплекса, являющегося одним из основных секторов экономики страны;
- научно-методические решения, связанные с построением распределенных частично децентрализованных систем, обеспечивающих доказательность предоставления целостной информации различной степени конфиденциальности, а также неотказуемость операций, выполненных с информационными объектами.

Роль и место рыбопромышленного комплекса в экономике СРВ характеризуется двумя взаимосвязанными факторами: во-первых – непосредственное формирование конечного продукта, составившего в 2022 году \$ 11 млрд., обеспечивающего около 5% доходной части бюджета страны и занятость более 4 млн. человек на более чем 600 предприятиях [3]; наполнение продовольственного рынка для внутреннего потребления; и, во-вторых – влияние на туристическую отрасль, определяемое доказательным подтверждением качества и аутентичности продуктов, предлагаемых иностранным туристам, имеющим опасения относительно санитарной безопасности и оригинальности продукции.

Около половины морепродукции СРВ добывается методом квотированного лова (*рисунок 1а*) и его объем приблизился к уровню естественноной воспроизводимости ресурсов, что актуализирует задачу *нормирования добычи биоресурсов* и развития искусственного выращивания аквакультур.

Вместе с тем, на государственном уровне сформировано понимание проблемы недостаточного контроля за деятельностью в рыбопромышленном комплексе [4] и приняты законодательные решения по ее регулированию [5-7].

Индустрия туризма СРВ развивается с темпом около 23% в год, вносит вклад до 9% в ВВП

<sup>2</sup> ЕГАИС - Единая государственная автоматизированная информационная система учета объема производства и оборота этилового спирта, алкогольной и спиртосодержащей продукции.

<sup>3</sup> ГИС МТ - Государственная информационная система мониторинга оборота товаров.

<sup>4</sup> Постановление Правительства РФ от 28.04.2006 N 253 (ред. от 13.07.2012) «О требованиях к техническим средствам фиксации и передачи информации об объеме производства и оборота этилового спирта и спиртосодержащей продукции».

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

[8] и имеет возможности для дальнейшего роста. Характеристикой ее устойчивости и перспектив роста является быстрое восстановление в посткризисный период (рисунки 1б и 1в). На государственном уровне [9] определена прямая взаимосвязь между этими отраслями, определяемая, в первую очередь, интересом иностранных туристов к национальной кухне, в значительной мере базирующейся на морепродуктах.

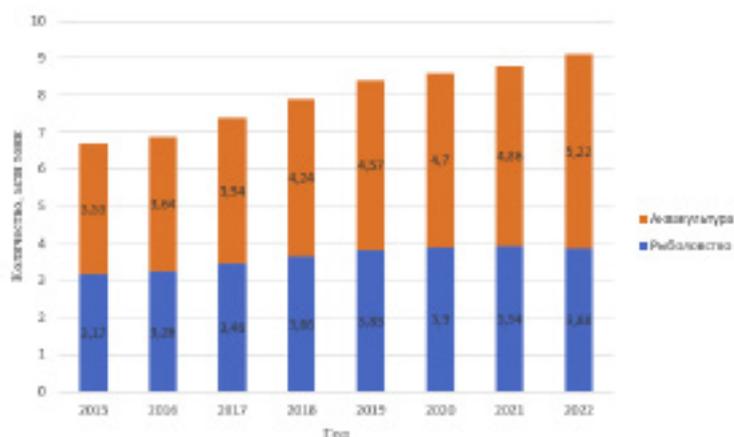
Предпосылками решения научно-методических и технологических задач по формированию системы доказательного подтверждения качества продукции являются ряд универсальных концепций, требующих адаптации к условиям рынков развивающихся стран.

Прежде всего, к ним следует отнести *общесистемные подходы обеспечения кибербезопасности* сложных распределенных информационных систем [10], в том числе базирующихся на сложно организованных данных [11]. Обе работы определяют концептуальные направления по разделению сложной проблемно-ориентированной системы, как минимум, на прикладной (целевой), логический и исполнительский уровни, а также предлагают рекомендации по разработке, согласованию и реализации решений по обеспечению кибербезопасности в рамках уже обозримых подсистем (уровней).

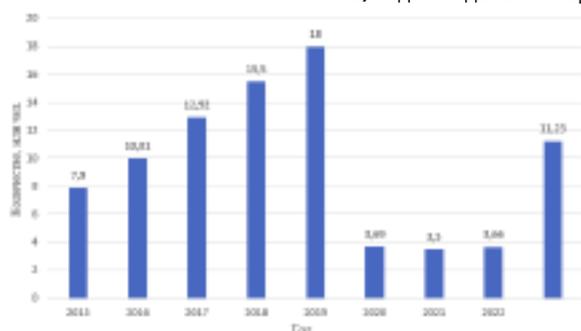
Следующим ключевым элементом, обеспечивающим достижение основной цели комплексной работы, являются *модели аутентификации* в слабо структурированных мультиагентных системах [12, 13], без реализации которых невозможно начало безопасного информационного взаимодействия в обсуждаемой прикладной системе.

В качестве основы обеспечения *целостности и неотказуемости*, использованы механизмы, развиваемые в моделях распределенного реестра (блокчейна):

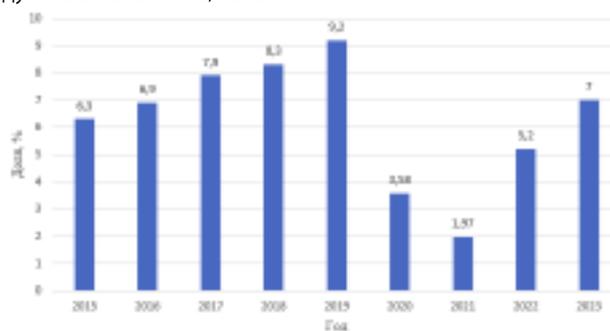
- подход, объединяющий модели атрибутивного доступа ABAC (Attribute-Based Access Control) и К-анонимности [14], в итоге предоставляющий расширенные возможности навигации в зашифрованном хранилище, но требующий строго централизованного управления и уязвимый к атакам при знании порогового значения вектора атрибутов;
- модели, использующие комбинации нескольких [15] или модифицированных систем распределенного реестра [16], адаптирующие универсальные подходы для получения дополнительных целевых свойств за счет контролируемого ухудшения некоторых других характеристик;
- модели коллективных вычислений без раскрытия содержания обрабатываемой информа-



а) Годовая добыча морепродуктов во Вьетнаме, 2015-2022 гг.



б) Доля прямого вклада туризма в ВВП СРВ



в) Количество иностранных туристов в СРВ

Рис. 1. Экономические показатели туризма рыбопромышленной отрасли в экономике СРВ

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ции SMPC (Secure Multi-Party Computation) [17], в том числе с использованием гомоморфной криптографии [18].

В рамках разработки общей архитектуры СОКП авторами предложено решение [19], основанное на классификации и разделении содержимого распределенного реестра на различные категории конфиденциальности, имеющее целью снижение требований к вычислительной сложности и повышение оперативности предоставления данных для динамического состава контрагентов.

Для решения частных задач обеспечения аутентификации, конфиденциальности и неотказуемости в рамках этой системы разработан метод безопасного распределения сессионного криптографического ключа [20].

В настоящей работе приводятся результаты формализованного анализа модели угроз прикладной СОКП для рыбопромышленного комплекса на основе моделирования ключевых бизнес-процессов и анализа удовлетворенности причастных сторон<sup>5</sup>.

### Архитектура системы и роли участников

В рамках комплексного исследования авторами предложена обобщенная архитектура СОКП для СРВ (рисунки 2).

Для достижения целей создания системы необходимым условием является выполнение следующей совокупности требований как, собственно, к данным о товаре (компоненте) или выполненном технологическом процессе, которые обращаются в системе, так и процессам, реализующим ее функциональность:

- данные должны собираться на каждом этапе расширенной производственной цепочки, определяющем качество конечного продукта;
- данные должны иметь гарантии целостности и достоверности;
- данные должны быть разделены по уровню конфиденциальности;
- предоставление конфиденциальных данных должно быть управляемым владельцем этих данных;
- данные должны быть доступны;
- процедуры участия в системе должны быть

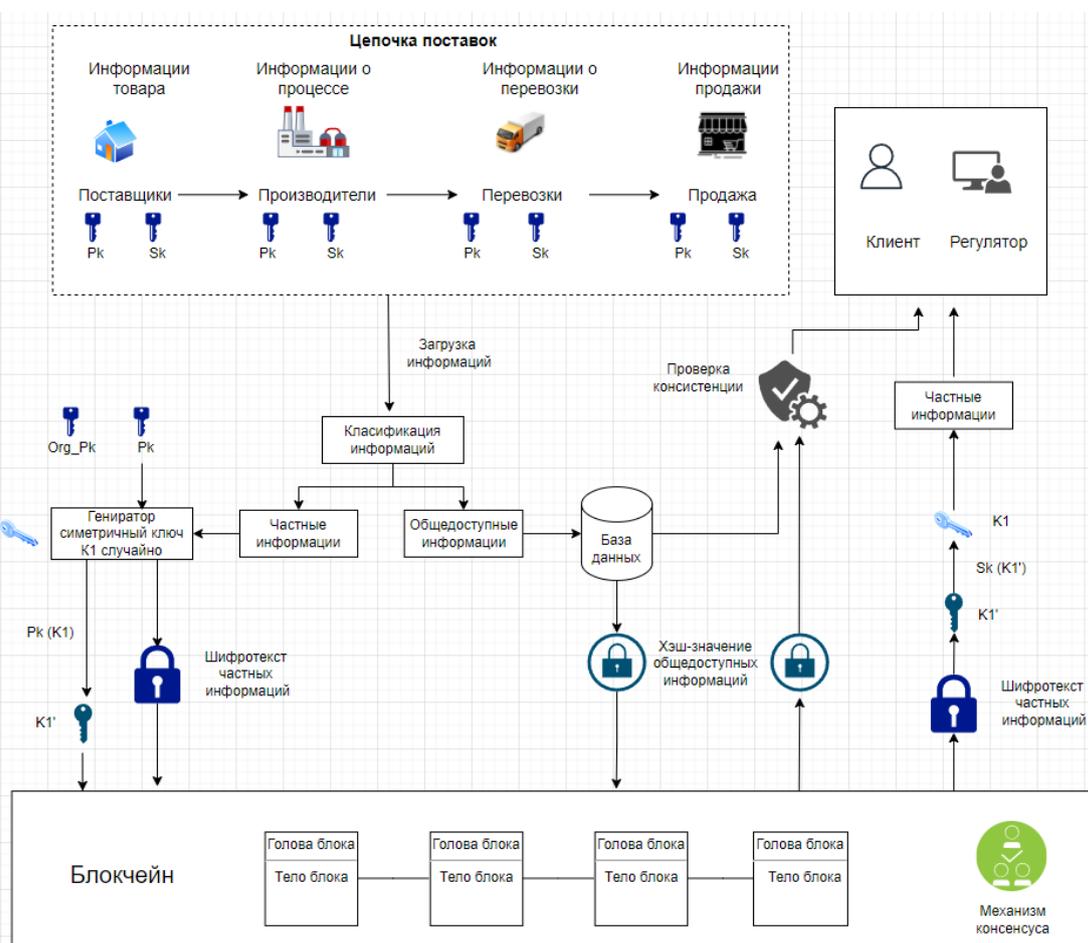


Рис. 2. Обобщенная архитектура системы прослеживаемости качества морепродуктов

<sup>5</sup> В терминах ГОСТ Р 51897-2011. Менеджмент риска. Термины и определения. Risk management. Terms and definitions.

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

экономически целесообразны.

Для уменьшения требований к вычислительным ресурсам системы и снижения латентности бокчейн-сети предлагается использование ограниченного подмножества узлов для хранения подписанных контрактов (рисунки 3), содержащих конфиденциальную информацию.

Это, несомненно, порождает ряд проблем, связанных с обеспечением абсолютного доверия, повышением вероятности компрометации контракта, сложностью контроля достаточности используемого подмножества, а также возможностью неконтролируемого размножения контракта сверх рационального подмножества.

И хотя эти проблемы требуют научно-методического разрешения, видится, что с точки зрения технической реализации прикладной системы они могут быть обойдены как за счет частных алгоритмических решений, так и в контексте бизнес-логики. Например, контракты, связанные с использованием квот на добычу морепродуктов, могут размещаться на подмножестве ресурсов промысловых субъектов – конкурентов, взаимно не заинтересованных в произвольной модификации данных, а периодический автоматизированный контроль надзорными органами делает нецелесообразным внесение заведомо некорректных данных самим субъектом.

Разделение единого пространства распределенного реестра на локальные подмножества

(рисунки 3) обосновывается спецификой технического обеспечения, технологических и информационных процессов прикладной системы. Отдельные подмножества могут формироваться по пространственному признаку или по признаку конкурирующих или замещающих продуктов. Например, считается целесообразным получение иностранным туристом (в добровольном порядке) аутентификационной информации СОКП на период действия визы непосредственно в процессе пограничного контроля. Такое включение в процесс получения данных о товаре и формирования отзыва аутентичного потребителя создает условия для удовлетворенности всех причастных сторон и снижает риски компрометации деловой репутации и рейтинга поставщика товаров (услуг). Более того, в условиях недостаточного качества каналов связи обеспечивается возможность выполнения целевых функций СОКП с использованием ближайшего доступного или собственного ресурса продавца.

Успешность реализации, а главное, использования прикладной информационной системы в значительной степени определяется удовлетворенностью причастных сторон. Основными причастными сторонами в рассматриваемой системе являются:

- надзорно-регуляторный орган (далее надзорный орган) – реализует государственную политику в фискальной области и области обеспе-

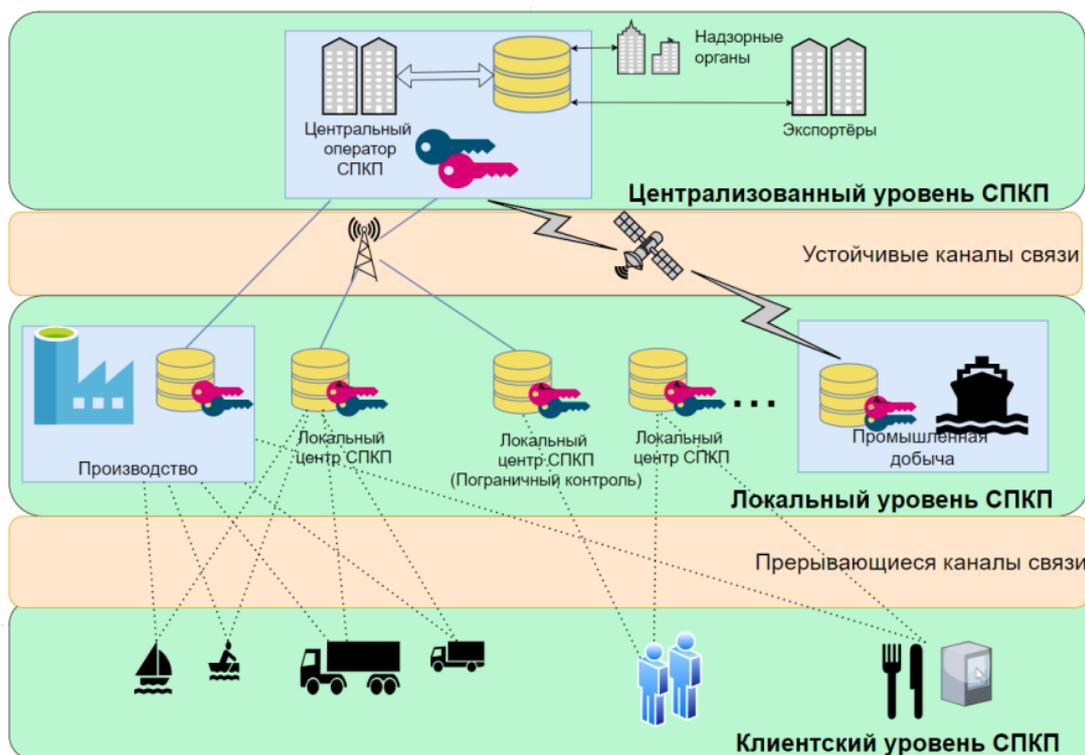


Рис. 3. Трёхуровневая модель декомпозиции системы с осознанной деградацией качества

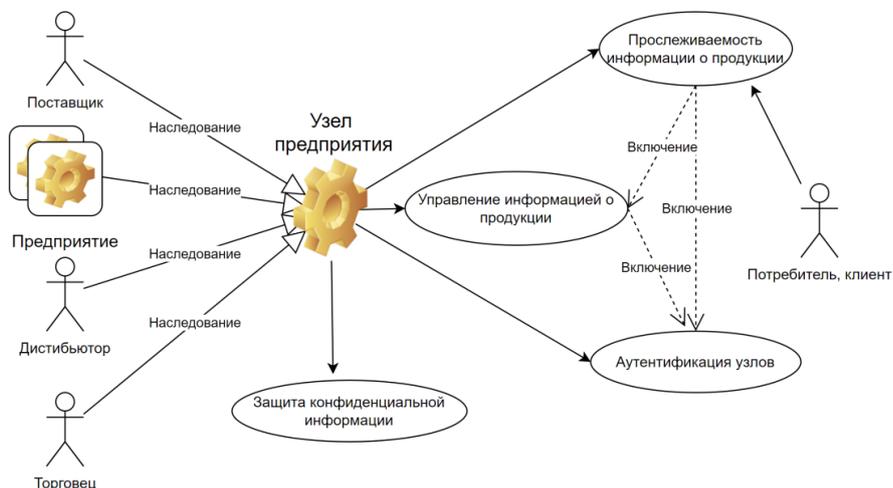
## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

чения качества и контроля происхождения продукции, отвечает за надзор за всей цепочкой поставок, от добычи сырья до продажи готовой продукции.

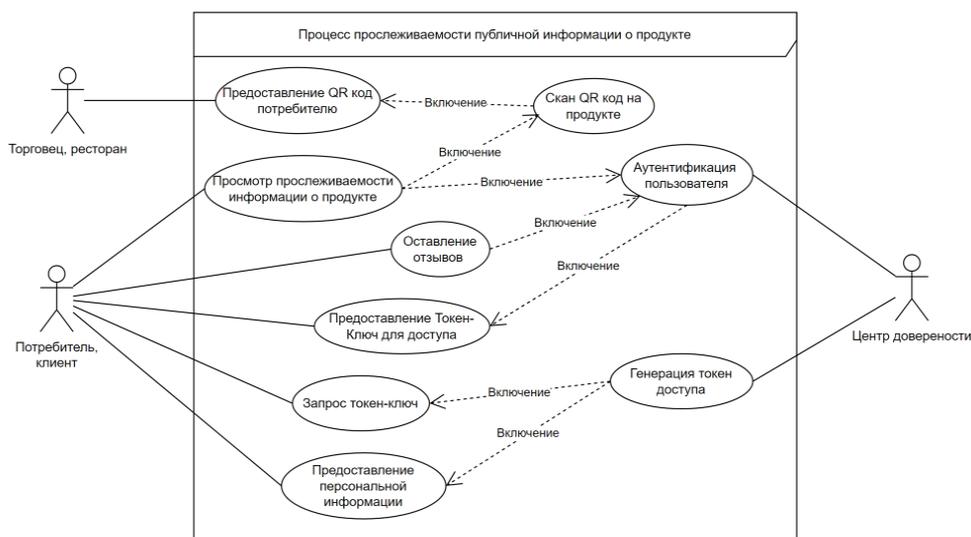
- производитель – создает продукт;

- поставщик – предоставляет сырье или компоненты производителю;

- дистрибьютор – предоставляет логистические услуги и распространение продукта (компонента) до уровня розничных продавцов;



**Рис. 4.** Основные информационные потоки СОКП «Предприятие»



**Рис. 5.** Основные информационные потоки СОКП «Продавец» и «Потребитель»



**Рис. 6.** Основные информационные потоки СОКП «Надзорный орган»

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

- продавец – обеспечивает доведение продукта до конечных потребителей.
- потребитель (клиент) – потребление товара на возмездной основе.

На рисунках 4-6 представлены модели информационных процессов, реализующих основные функциональные задачи СОКП.

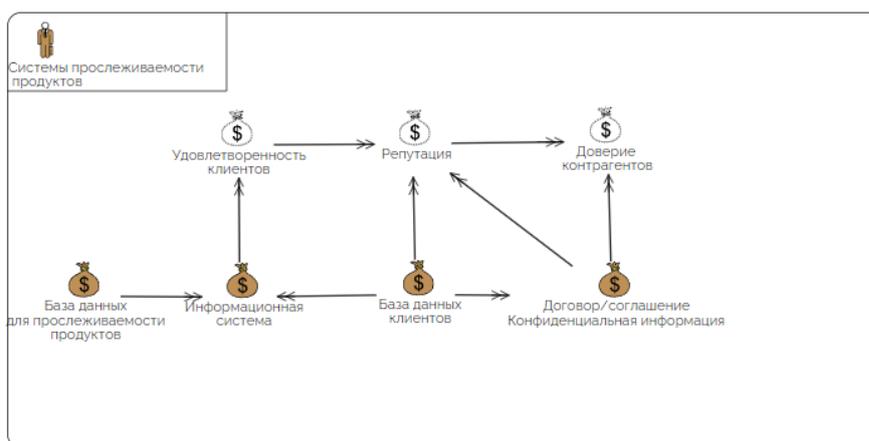
Анализ ключевых информационных потоков

СОКП позволяет определить номенклатуру и ценность основных активов каждой из причастных сторон, например «Продавца» (таблица 1).

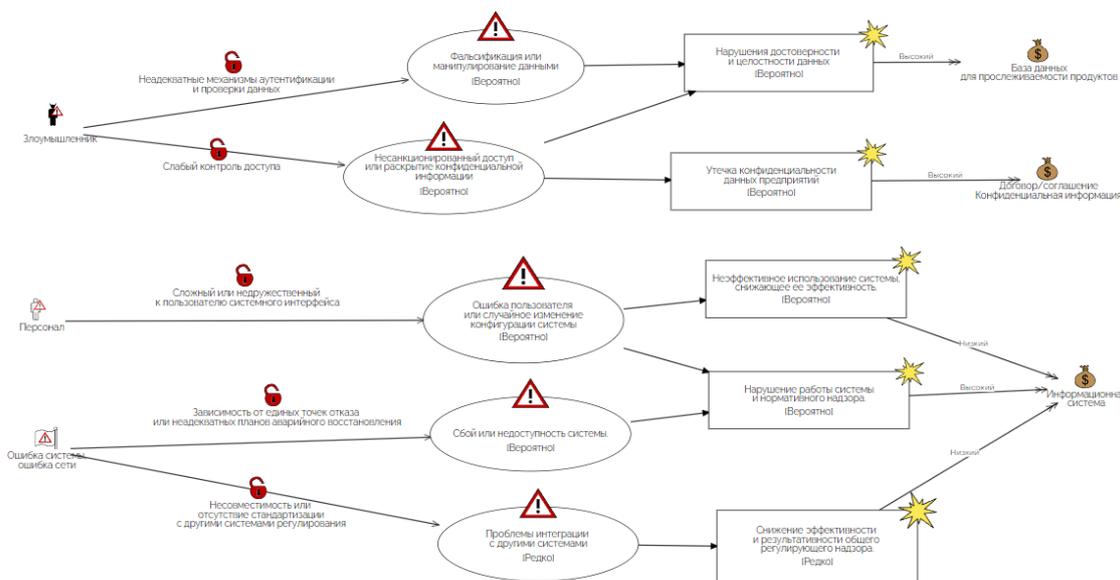
Графическое представление модели угроз процессов (рисунки 4-6) выполнено с использованием специализированной среды CORAS<sup>6</sup>, имеющей достаточно широкое распространение и обеспечивающей единство понимания графиче-

**Таблица 1**  
Классификация активов «Продавца»

Актив	Важность	Вид актива
Информационная система	1	Прямой актив
Договор/соглашение	1	Прямой актив
Конфиденциальная информация	2	Прямой актив
База данных для прослеживаемости продуктов	2	Прямой актив
База данных клиентов	2	Прямой актив
Удовлетворенность клиентов	2	Косвенный актив
Репутация	3	Косвенный актив
Доверие контрагентов	3	Косвенный актив



**Рис. 7.** Диаграмма активов в системе прослеживаемости продуктов



**Рис. 8.** Модель угроз по запросу «Предприятия»

<sup>6</sup> <https://coras.tools/#/>

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ческих моделей среди специалистов в области кибербезопасности.

Формализованное представление ценности активов (рисунк 7) и моделей угроз информационным процессам по запросу Предприятия, Потребителя и Надзорного органа (рисунки 8-10, соответственно) обеспечивают корректность идентификации причин возникновения потенциальных рисков их взаимосвязь и качественную оценку.

Приведенные в данной работе формализованные модели угроз СОКП с точки зрения практики обеспечения кибербезопасности могут быть использованы для формирования органи-

зационных и технических требований, а также для обоснования необходимых экономических ресурсов для реализации системы.

Как известно, модели, формируемые в среде CORAS, представляются в открытом расширяемом формате .json, что, с точки зрения развития теоретических моделей информационной безопасности на основе рискованных подходов, обеспечивает возможность автоматизации процесса оценки рисков, например, при интеграции с автоматизированными системами оценки уязвимостей CVSS (Common Vulnerability Scoring System) [21] или применением классических кибернетических моделей [22].

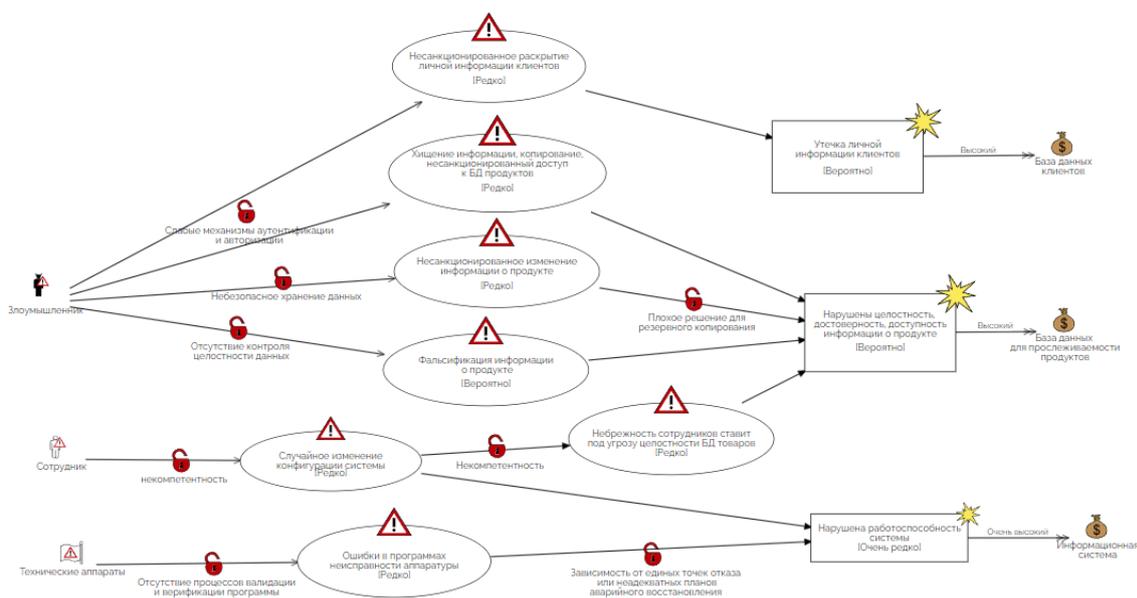


Рис. 9. Модель угроз по запросу «Потребителя»

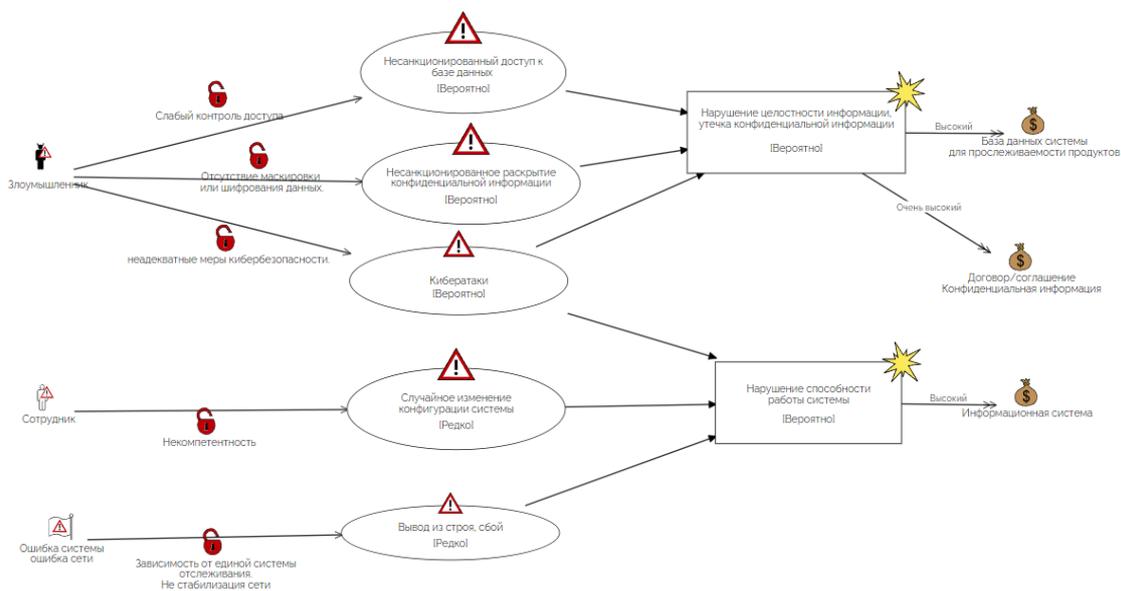


Рис. 10. Модель угрозы по запросу «Надзорного органа»

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

### Заключение

В работе поставлена и решена задача формализованной разработки и представления обобщенной модели угроз системы прослеживаемости качества морепродуктов для развивающихся рынков, учитывающей технологические ограничения и особенности ее использования.

Полученное формализованное представление как модели угроз, так и основных информационных процессов обеспечивает формирование системы требований по обеспечению информационной безопасности целевой системы на ранних этапах проектирования.

С учетом итерационного процесса определения технологических нормативно-правовых решений в обсуждаемой предметной области полученные модели будут модифицироваться и, в свою очередь, определять изменения других видов обеспечения информационной системы. Возможности выбранного формата машинного представления моделей допускает их повторное использование как в контексте модификации полученных моделей, так и в контексте их эволюционного развития.

### Литература

1. Постановление Правительства РФ от 31 декабря 2020 г. №2466 «О ведении и функционировании единой государственной автоматизированной информационной системы учета объема производства и оборота этилового спирта, алкогольной и спиртосодержащей продукции» (с изменениями и дополнениями), Федеральный закон «О государственном регулировании производства и оборота табачных изделий, табачной продукции, никотинсодержащей продукции и сырья для их производства» от 13.06.2023 №203-ФЗ (последняя редакция),
2. п.п. 11 и 18 Паспорта научной специальности 2.3.6. «Методы и системы защиты информации, информационная безопасность», введенного в действие Приказом Министерства науки и высшего образования РФ от 24 февраля 2021 г. №118 «Об утверждении номенклатуры научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени, и внесении изменения в Положение о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, утвержденное приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 10 ноября 2017 г. №1093» (с изменениями и дополнениями). URL: <https://vak.minobrnauki.gov.ru/uploader/loader?type=17&name=92259542002&f=14813> (дата обращения 20.11.2023).
3. Главное статическое управление Вьетнама. Обзор рыбной промышленности. Электронный ресурс: URL: <https://vasep.com.vn/gioi-thieu/tong-quan-nganh> (дата обращения 20.11.2023).
4. Оценка экономического эффекта от незаконной, незарегистрированной и нерегулируемой (ННН) эксплуатации рыболовных ресурсов: Вьетнамский случай. Электронный ресурс: URL: <https://wtocenter.vn/file/18515/a-trade-based-analysis-of-the-economic-impact-in-vnese.pdf> (дата обращения 20.11.2023).
5. Закон о рыбной промышленности №18/2017/QH14. Электронный ресурс: URL: <https://luatvietnam.vn/nong-nghiep/luat-thuy-san-2017-118855-d1.html> (дата обращения 20.11.2023).
6. Указ 26/2019/ND-CP, регулирующий закон о рыбной промышленности. Электронный ресурс: URL: <https://thuvienphapluat.vn/van-ban/Linh-vuc-khac/Nghi-dinh-26-2019-ND-CP-huong-dan-Luat-Thuy-san-356284.aspx> (дата обращения 20.11.2023).
7. Указ 17/2018/ND-CP о политике развития рыбной промышленности. Электронный ресурс: URL: <https://thuvienphapluat.vn/van-ban/Bo-may-hanh-chinh/Nghi-dinh-17-2018-ND-CP-sua-doi-Nghi-dinh-67-2014-ND-CP-chinh-sach-phat-trien-thuy-san-374719.aspx> (дата обращения 20.11.2023).
8. Министерство культуры, спорта и туризма. Департамент туризма Вьетнама. Электронный ресурс: <https://vietnamtourism.gov.vn/statistic/receipts>
9. Циркуляр 21/2018/TT-BNNPTNT. Электронный ресурс: URL: <https://thuvienphapluat.vn/van-ban/Tai-nguyen-Moi-truong/Thong-tu-21-2018-TT-BNNPTNT-quy-dinh-ghi-nop-bao-caonhat-ky-khai-thac-thuy-san-405948.aspx> (дата обращения 20.11.2023).
10. Гурина Л.А., Томин Н.В. Разработка комплексного подхода к обеспечению кибербезопасности взаимосвязанных информационных систем при интеллектуальном управлении сообществом микросетей // Вопросы кибербезопасности, 2023. №.4 (56). С.94-104.
11. Полтавцева М. А., Зегжда Д. П., Калинин М.О. Многоуровневая концепция безопасности систем управления большими данными // Вопросы кибербезопасности, 2023. №.5(57). С.25-36.
12. Басан А.С., Басан Е.С., Ищукова Е.А., Корнилов А.П. Протокол взаимной аутентификации группы объектов с динамической топологией // Вопросы кибербезопасности, 2023. №.4(56). С.41-52.
13. Балюк А.А., Финько О.А. Многоагентная аутентификация цифровых двойников в киберфизических системах // Вопросы кибербезопасности, 2022. №.5(51). С.100-113.

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

14. Yingwen Chen, Linghang Meng, Huan Zhou, Guangtao Xue. «A Blockchain-Based Medical Data Sharing Mechanism with Attribute-Based Access Control and Privacy Protection», *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2021, Article ID 6685762, 12 pages, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/6685762>.
15. Zheng B.K., Zhu L.H., Shen M. et al. Scalable and privacy-preserving data sharing based on blockchain. *Journal of computer science and technology* 33(3): 557-567. May 2018. DOI 10.1007/s11390-018-1840-5.
16. Шилов И.М., Заколдаев Д.А. Модель устойчивого распределенного реестра для анализа безопасности многомерного блокчейна // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 2021. Т.21. №. 2. С.249-255.
17. Yuhan Yang, Lijun Wei, Jing Wu, and Chengnian Long. 2020. Block-SMPC: A Blockchain-based Secure Multi-party Computation for Privacy-Protected Data Sharing. In *Proceedings of the 2020 The 2nd International Conference on Blockchain Technology (ICBST'20)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, March 2020. P. 46-51. <https://doi.org/10.1145/3390566.3391664>.
18. Аракелов Г.Г. Вопросы применения прикладной гомоморфной криптографии // *Вопросы кибербезопасности*, 2019. №.5(33). С. 70-74.
19. Лэ В., Ву Л., Комаров И. И. Обеспечение информационной безопасности в системе прослеживаемости морепродуктов на основе технологии блокчейна // *Наука и бизнес: пути развития*, 2022. №.5. С.97-101.
20. Лэ В.Х., Бегаев А.Н., Комаров И.И., Фунг В.К. Верификация метода безопасного распределения сессионного ключа в системе отслеживания качества продукции // *Вопросы кибербезопасности*, 2023. №.6(58). С.25-34.
21. Wirtz R., Heisel M. Model-based risk analysis and evaluation using CORAS and CVSS // *Evaluation of Novel Approaches to Software Engineering: 14th International Conference, ENASE 2019, Heraklion, Crete, Greece, May 4-5, 2019. Revised Selected Papers 14*. Springer International Publishing, 2020. С.108-134.
22. Ремесник Е.С. Применение теории игр к оценке рисков информационной безопасности предприятия // *Проблемы информационной безопасности*, 2019. С.161-163.

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 539.182

## СПИН-ПАРТОННЫЙ ПУТЬ К КВАНТОВАНИЮ ПРОТОНА SPIN-PARTON PATH TO THE PROTON QUANTIZATION

**Сергей Владимирович Смуров**  
почетный работник науки и техники РФ  
доктор технических наук, профессор  
Первый Вице-президент Института –  
Главный конструктор  
АНО «Институт инженерной физики»  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7 (4967) 35-31-93  
E-mail: Svs\_iif@mail.ru

**Геннадий Германович Волков**  
доктор физико-математических наук, профессор  
старший научный сотрудник  
АНО «Институт инженерной физики»  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7 (4967) 35-31-93  
E-mail: gennadii.volkov@rambler.ru

### Аннотация

Одна из важнейших задач Стандартной Модели связана с квантованием протона/нейтрона и всей адронной материи, решение которой открывает окно в истинную структуру этих микрообъектов, способной объяснить конфайнмент цвета в адронах, означая невозможность существования цветных кварков и глюонов в свободном состоянии. Путь к поиску такого решения лежит в исследовании динамики партонов внутри нуклонов и мезонов наряду с их спиновыми свойствами. Это мотивируется рядом важнейших проблем сильного взаимодействия, таких как происхождение массы, дробного заряда кварков, спина, стабильности протона, а также вопросами о возможной субструктуре кварков и гипотетических тернарных взаимодействиях за пределами цветовой калибровочной  $SU(3^c)$ -симметрии.

**Ключевые слова:** квантовая хромодинамика, спин, партон, протон, адрон, глюон, партонные функции распределения, квантовая запутанность

### Summary

One of the most important problems of the Standard Model is associated with the quantization of the proton/neutron and all hadronic matter, the solution of which opens a window into the true structure of these micro-objects, which can explain the confinement of color in hadrons, meaning the impossibility of the existence of colored quarks and gluons in a free state. The path to finding such a solution lies in studying the dynamics of partons inside nucleons and mesons along with their spin properties. This is motivated by a number of important problems of the strong interaction, such as the origin of mass, fractional charge of quarks, spin, proton stability, as well as questions about the possible substructure of quarks and hypothetical ternary interactions beyond the color gauge  $SU(3^c)$  symmetry.

**Keywords:** quantum chromodynamics, spin, parton, proton, hadron, gluon, parton distribution functions, quantum entanglement

### 1. $SU(3^c)$ -симметрия о внутреннем мире протона

Нуклоны, протоны и нейтроны, вместе с электронами являются составляющими атомов, образующих всю периодическую таблицу Менделеева и которые представляют большую часть видимой материи во Вселенной, и в частности, всю биологическую живую материю. Нуклоны, как и все другие адроны, характеризуются богатой внутренней структурой и состоят из элементарных частиц, кварков и глюонов, известных под общим названием партоны. Эти партоны прочно удерживаются внутри нуклонов благодаря свойствам сильного взаимодействия в рамках квантовой хромодинамики (КХД).

Кварк-глюонная структура нуклонов и динамика их взаимодействия, на сегодняшний день является чуть ли не главной проблемой физики адронов и элементарных частиц, решение ко-

торой имеет первостепенное значение для будущего человечества на планете. Научный мир планеты стоит перед важнейшими открытиями в микромире нуклонов и огромной совокупности адронов, как когда-то, подобное случилось в начале XX века перед открытием квантования атома водорода и последующего создания атомной и ядерной физик. Можно только отметить, что в силу того, что нуклонная материя распределена глобально повсюду, практическая значимость ожидаемых новых открытий будет иметь исключительные последствия.

Такое сильное заключение коренится в последних экспериментальных достижениях квантовой физики микромира, связанных с подтверждением теоретического описания трех видов взаимодействия: электромагнитного, слабого и сильного, в рамках Стандартной модели (СМ) с исходной калибровочной унитарной сим-

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

метрией  $U(1_V) \times SU(2_C) \times SU(3^c)$ . Создание «единой» теории электромагнитных и слабых взаимодействий в рамках калибровочной  $U(1_V) \times SU(2_C)$  симметрии с механизмом спонтанного нарушения до калибровочной  $U(1_{EM})$  симметрии, начатое еще во второй половине XX века, было подтверждено открытием бозона Хиггса с массой 125 ГэВ/с в 2012 году. В то время, как действие слабых взаимодействий проникает на глубочайшие дистанции микромира  $r \sim 0,01$  фм, (1 фм =  $10^{-13}$  см), ответственных за нестабильность кварков и лептонов, действие сильных взаимодействий в рамках калибровочной  $SU(3^c)$ -симметрии, определяемой как квантовая хромодинамика (КХД), должно быть ограничено размерами нуклонов и мезонов, то есть порядка размера конфайнмента  $r_c \sim 1$  фм. Сильные взаимодействия в рамках калибровочной  $SU(3^c)$ -симметрии, обусловленные обменами между 3-х цветовыми кварками  $\Psi_\alpha (\alpha=1,2,3)$  векторными бозонами  $G_\mu^a (a=1,2,\dots,8)$ , могут быть представлены в виде лагранжиана Янга-Милза:

$$L = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F^{\mu\nu a} + \sum_f (\bar{\psi}^{(f)} (i\gamma_\mu \partial_\mu - m_f) \psi^{(f)} + g_s \bar{\psi}^{(f)} \gamma^\mu T^a G_{\mu\nu} \psi^{(f)})$$

$$F_{\mu\nu}^a = \partial_\mu G_\nu^a - \partial_\nu G_\mu^a - g_s f_{abc} G_\mu^b G_\nu^c \quad (1)$$

где сумма идет по индексам Лоренца, цветовым индексам  $\alpha=1,2,3$  и всем видам  $f=6$ -кварков, распределенных по трем поколениям:

$$\psi_\alpha^{(f)} = \{u_\alpha, d_\alpha, c_\alpha, s_\alpha, t_\alpha, b_\alpha\} \rightarrow \begin{pmatrix} u_\alpha \\ d_\alpha \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c_\alpha \\ s_\alpha \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t_\alpha \\ b_\alpha \end{pmatrix}, \alpha=1,2,3 \quad (2)$$

Генераторы группы  $T^a (a=1,2,\dots,(n^2-1)=8)$ , соответствующие 8-ми глюонам, образуют полный базис  $3 \times 3$  эрмитовых бесследовых  $3 \times 3$ -матриц. В теории Янга-Милса объединение кварковой и партонной картин происходит через расширение глобальной цветовой симметрии  $SU(3^c)$  до локальной симметрии. Кварковые поля, несущие цветовые квантовые числа,

$$\psi(x) = (\psi_1(x), \psi_2(x), \psi_3(x))^T$$

преобразуются как

$$\psi(x) \rightarrow U(x) \psi(x), \text{ где } U(x) = \exp(i\omega_a(x) T^a), \quad (3)$$

где эрмитовость генераторов  $T^a$  соответствует унитарности  $SU(3^c)$ -матриц  $U(x): U^\dagger U = 1$ , причем локальность преобразования  $U(x)$  осуществляется координатной зависимостью вещественных параметров  $\omega_a(x)$ .  $su(3)$ -алгебра Ли группы  $SU(3)$  определяется коммутационными соотношениями

$$[T^a, T^b] = i f^{abc} T^c, \quad (4)$$

в котором структурные константы  $f^{abc}$  вещественны и антисимметричны по индексам  $a, b$  и  $c$ .

Одной из определяющих особенностей калибровочной  $SU(3^c)$ -теории, описывающей сильные взаимодействия цветных партонов, является

рост энергии связи между партонами в случае увеличения расстояния между ними. Именно на этом обстоятельстве строятся аргументы, касающиеся конфайнмента цвета в адронах с вытекающим следствием о возможности существования партонов в свободном состоянии только в бесцветных состояниях. Здесь возникает вопрос о возможно различных динамиках конфайнмента в адронах с полужелым спином  $s=1/2, 3/2, \dots$  (нуклоны, барионы) с нуклонами, и с целым спином  $s=0, 1, \dots$  (мезоны, бозоны).

Одной из проблем квантования протона-нейтрона, решение которой позволило бы определить все партонные составляющие, включая их распределения по импульсу и спину, является плохо изученный непертурбативный режим сильного взаимодействия. В этом режиме расчеты из первых принципов являются сложными, и большинство партонных свойств необходимо извлекать из экспериментальных данных с помощью глобального анализа КХД. С одной стороны, эти партонные свойства открывают уникальное окно для решения фундаментальных вопросов о внутренних механизмах сильного взаимодействия и структуре адронов, например, происхождения массы и спина нуклона, движение кварков и глюонов внутри массивных ядер или возникновение новых состояний материи. С другой стороны, точное описание партонной субструктуры нуклонов является важной проверкой достаточности калибровочной  $SU(3^c)$ -симметрии или, например, для квантования протона-нейтрона потребуется новая локальная симметрия, например, тернарная  $TSU(3)$  [1-3].

### 2. Партонная динамика в лептон-нуклонных и нуклон-нуклонных процессах

К путям извлечения ароматной и спиновой структур нуклона в основном относят следующие эксперименты: глубоконеупругие электрон-нуклонные столкновения (ГНС),  $e+N \rightarrow e+X$  (см. рисунок 1), нуклон (ядерные)-нуклонные (ядерные) столкновения с большим переданным импульсом,  $N+N \rightarrow A+X$ , электрон-позитрон аннигиляцию  $e^-+e^+ \rightarrow A+X$  [4-7]. Если лептоны (например, электроны, мюоны, нейтрино), не имеют какой-либо известной субструктуры, то напротив, нуклоны оказываются сильно связанными состояниями валентных  $u_\alpha$ - и  $d_\alpha$ -кварков с отличительной особенностью их внутренней структуры, которая может содержать морские глюоны и кварки ( $u_\alpha, d_\alpha, s_\alpha, c_\alpha, b_\alpha$ ) и их антикварки. В добавление, динамика всех кварк-глюонных составляющих, партонов, значительно меняется в случае, когда нуклоны, протоны и нейтроны, сами становятся строительными блоками

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

массивных ядер, отражая богатейшую картину ядерной динамики.

Так как подобные элементарные взаимодействия партонов происходят на расстояниях, значительно короче, чем масштаб конфайнмента  $r \ll r_c \sim 1$  фм, при котором партоны связываются в нуклоны, то в рамках КХД измеримое сечение полного процесса можно определять через сечение взаимодействия партонов и функции распределения партонов (parton function distribution ПДФ). Партонное сечение кодирует рассеяние квазисвободных партонов в процессе элементарного взаимодействия, которое вычисляется пертурбативно, в то время как ПДФ подробно описывают импульсное распределение партонов в нуклоне, входящих в тот или иной элементарный процесс. В связи с тем, что адронная структура не зависит от вида измерения, извлекаемые ПДФ из различных жестких процессов, таких как глубоко неупругие лептон-нуклонные рассеяния и нуклон-нуклонные соударения при больших поперечных импульсах, должны быть одинаковыми.

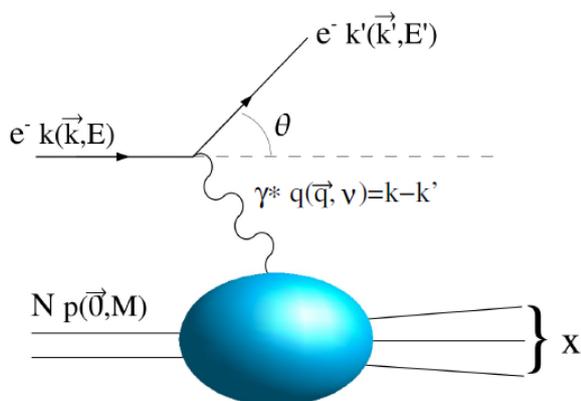
Первые глубоко-неупругие эксперименты были связаны с рассеянием заряженных лептонов (электронов, мюонов) на неподвижной мишени. Впоследствии проводились аналогичные эксперименты по рассеянию нейтрино высоких энергий на нуклонах и ядрах, которые явились еще одним дополнительным вкладом в исследование структур нуклона [4-7].

Для характеристики кинематики используются две инвариантные переменные: квадрат переданного 4-импульса  $Q^2 = -(k-k')^2$ , квадрат инвариантной массы

$$W^2 = (p + q)^2 = m_1^2 + 2m_1 v - Q^2,$$

где  $v = E - E'$ ;

$m_1$  – масса ядра-мишени;



**Рис. 1.** Инклюзивное рассеяние электрона на нуклоне в первом борновском приближении. Капля представляет собой непертурбативную реакцию мишени (нуклон/ядро) на падающий виртуальный фотон (см. рисунок в [4])

$W$  – масса системы, образовавшейся после лептон-ядерного столкновения; ядерное возбужденное состояние.

Переменная Бьёркена  $x_B = Q^2/2pq = Q^2/2m_1 v$ ,  $0 < x_B < m_1/m_N$ , где  $m_N$  – масса нуклона.

Процесс  $e^+e^-$ -аннигиляции, при котором в конечном состоянии регистрируется только один адрон(нуклон), является времениподобной версией ГНС. Структура нуклонов параметризуется функциями фрагментации, аналитическая форма которых ограничена фундаментальными симметриями.

Кинематическая область лептон-нуклонных (ядерных) столкновений с Бьёркенским скейлингом соответствует  $W > 2\text{ГэВ}$  и  $Q^2 > 1\text{ГэВ}^2$ . Благодаря асимптотической свободе КХД в этой области можно использовать теорию возмущений (пертурбативно) и проводить расчеты в диаграммной технике  $SU(3^c)$ -калибровочной теории. В пределе Бьёркена, где  $v \rightarrow \infty$  и  $Q^2 \rightarrow \infty$  при фиксированном  $x_B = Q^2/(2Mv)$ , ГНС в первом приближении можно представить упругим рассеянием лептона на фундаментальном кварковом конstituенте нуклона. Возможность при высоких передачах импульса лептона отдельного учета пертурбативных взаимодействий фотонов с кварками мишени и непертурбативной структуры нуклона является сущностью теоремы факторизации [8]. В неупругих нуклон-нуклонных соударениях с большими передачами импульсов справедливость этой теоремы также следует благодаря асимптотической свободе, открывающей возможность вести расчеты элементарных партон-партонных процессов в рамках пертурбативной КХД.

Рассматриваемые партонные распределения кварков и глюонов по импульсам являются универсальными функциями (ПДФ) так, как они отражают свойства самих нуклонов и, следовательно, должны быть независимыми от конкретной высокоэнергетической реакции, используемой для зондирования нуклона. Фактически все кварк-глюонные взаимодействия внутри нуклона (адронов), которые происходят до лептон-кваркового соударения, содержатся в этих функциях (собственные состояния КХД гамильтониан), которые отражают непертурбативную динамику запираания кварков и глюонов в адронах, скрытую в основах КХД ( $SU(3^c)$ ).

ГНС в Бьёркен-пределе эффективно представляет собой упругое рассеяние лептонов на точечных кварковых составляющих нуклона, так что структурные функции нуклонов будут зависеть только от безразмерного отношения  $x_B$ , что отражает конформную инвариантность. Фактически это предсказание «конформной» теории

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

{теории квантового поля точечных кварков без фундаментальной шкалы масс}. Это предсказание было подтверждено первыми измерениями в области  $x_B \sim 0,25$  [4-7]. Однако в калибровочной КХД-теории, Бьёркеновский скейлинг нарушается логарифмическими поправками процессов пертурбативной КХД, таких как глюонное излучение. Также отклонения от Бьёркеновского скейлинга предсказываются из-за степенных поправок  $\sim M^2/Q^2$ , вызванных процессами с высокими твистами, отражающими поправки на конечные массы и жесткое рассеяние с участием двух и более кварков. Такие эффекты становятся особенно сильными в области малых  $Q^2 \sim (0,1 \text{ ГэВ}^2)$ , соответствующей конфайнменту цвета в адронах.

Так как структура нуклонов не зависит от измерения, то ПДФ, измеренные в лептон-нуклонном глубоко неупругом рассеянии были использованы в протон-протонных соударениях в открытиях топ-кварка, векторных  $W_{\mu}^{\pm}, Z_{\mu}^0$ -бозонов, Хиггсовского бозона  $H^0$ . Для расчетов таких событий и ряда других жестких процессов в нуклон-нуклонном рассеянии используется ряд элементарных процессов (см. примеры на рисунке 2).

Сечение обычного неполяризованного нуклон-нуклонного процесса, который зависит от масштаба  $Q$  (например,  $pp \rightarrow AX$ , где  $A$  может быть, например, одиночной струей адронов, лептонной или кварковой парой или электро-слабым  $W$ -бозоном), имеет следующее фактори-

зованное выражение,

$$\sigma(s, A) = \sum_{f, f'} \sigma_{f, f'}^0 \int_{\tau}^1 \frac{dx}{x} \int_{\tau/x}^1 \frac{dy}{y} f^N(y, Q^2) f^N(\frac{x}{y}, Q^2) C_{f, f'}(\frac{\tau}{x}, \alpha_s(Q^2)) \quad (5)$$

где сумма пробегает все активные кварки  $f$  и глюон;

$s$  – энергия центра масс адронного столкновения;

$\tau = Q^2/s$  – масштабирующая переменная адронного процесса;

$\sigma_{ff'}^0$  – партонное сечение лидирующего порядка (LO);

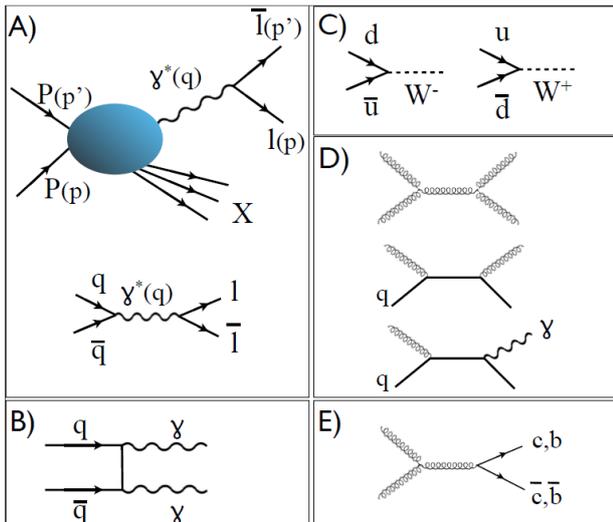
$f^N$  и  $f^N$  – неполяризованные ПДФ, исходящие от каждого нуклона;

$C_{ff'}$  – коэффициенты жесткого партонного рассеяния вычисляются как степенной ряд по константе сильной связи  $\alpha_s = \alpha_s/4\pi$ .

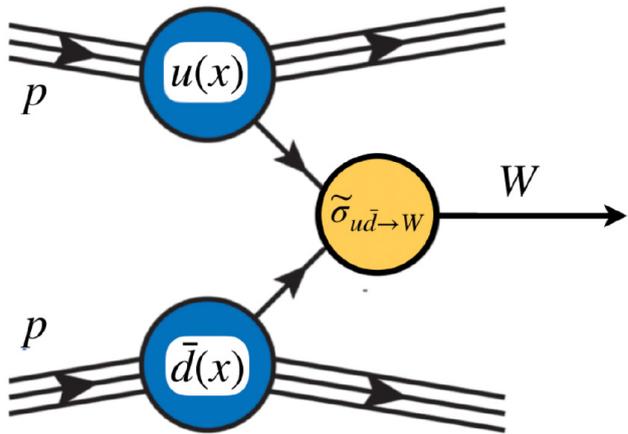
Коэффициенты партонного рассеяния  $C_{ff'}$ , входящие в уравнения для различных процессов, могут быть вычислены в виде ряда пертурбативной сильной связи до более высоких порядков, (NLO) и (NNLO), которые обычно влекут за собой три класса перенормируемых особенностей: ультрафиолетовые; инфракрасные и коллинеарные особенности [7].

### 3. Глобальный анализ КХД

Стратегия глобального анализа использует центральное свойство КХД, известное как факторизация, согласно которому полное сечение взаимодействия  $\sigma$  процессов с участием адронов в начальном состоянии столкновения, можно разделить на два независимых вклада. Первый –



**Рис. 2.** Реакции соударений в лидирующем порядке (leading order LO), исследующие спиновую структуру протона. А: Процесс Дрелла-Яна. В: Прямое производство дифотонов. С: рождение  $W_{\mu}^{(+)}, W_{\mu}^{(-)}$ . D: LO-процесс, доминирующий в образовании фотонов, пионов и/или джетов. Е: производство мезонов с массивными кварками (см. рисунок в [4])



**Рис. 3.** Диаграмма, связанная с образованием  $W$ -бозона в протон-протонных столкновениях, характеризует процесс Дрелл-Яна. Благодаря теоремам факторизации КХД и свойствам универсальности ПДФ легких  $u$ - и анти- $d$ - кварков можно использовать для расчета сечения образования  $W_{\mu}^{\pm}$ -бозона в протон-протонных столкновениях (см. рисунок в [ 5])

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

партонное сечение жесткого рассеяния на малых расстояниях, вычисляемое с помощью диаграмм КХД (КЭД). Второй вклад кодирует информацию о структуре протона, определяемую непертурбативной динамикой на больших расстояниях, в партонные функции распределения (ПДФ). Другое важнейшее нетривиальное свойство КХД, позволяющее использовать информацию, содержащуюся в ПДФ в различных экспериментах, заключается в их универсальности. Благодаря теоремам факторизации КХД и свойствам универсальности ПДФ, из лептон-протонных столкновений можно извлечь ПДФ протона, а затем использовать те же ПДФ для прогнозирования сечений в протон-протонных столкновениях [4-7] (см. рисунок 3).

Этот подход обычно известен как глобальный анализ КХД, который успешно применяется для более детального понимания партонной структуры нуклонов и ядер. Существуют различные типы ПДФ, например, такие как спин-зависимые, так и спин-независимые, коллинеарно-интегрированные или зависящие от поперечного импульса. Для интерпретации результатов экспериментов при высоких энергиях, таких как протон-протонные столкновения на большом адронном коллайдере, для начального анализа достаточно использовать коллинеарные неполяризованные ПДФ нуклонов и ядер.

Для коллинеарного неполяризованного партона обычно принимаются следующие обозначения: функции распределения его в протоне:  $f_i(x, Q^2)$ ;  $i=u, d, s, \dots, g$ , где индекс  $i$  указывает на аромат партона, а  $n_f$  обозначает количество активных партонов в масштабе  $Q$ ,  $x$  обозначает долю импульса нуклона, переносимую  $i$ -м партоном (переменная Бьеркена  $x_B$ , а  $Q^2$  – энергетический масштаб, который также соответствует обратной величине разрешающей дистанции и импульса, передаваемого в процессе рассеяния, в котором нуклон исследуется. Кварк считается безмассовым партоном только в случае, если передаваемый импульс превышает его массу,  $Q > m_q$ ; в противном случае предполагается, что массивное состояние не вносит вклад в партонную субструктуру протона. Например, при  $Q=10$  ГэВ можно было бы иметь  $n_f=11$ , учитывая, что существует пять кварковых ПДФ ( $u, d, s, c, b$ -кварки) и соответствующие анти-кварки, дополненные глюонной ПДФ [4].

В главном порядке (LO) пертурбативного разложения КХД по константе сильной связи  $\alpha_s$ , ПДФ можно интерпретировать, как плотность вероятностей. Это свойство подразумевает, что  $g(x, Q=10 \text{ ГэВ})dx$  будет соответствовать числу глюонов в протоне на масштабе  $Q = 10 \text{ ГэВ}$ ,

которые несут долю импульса между  $x$  и  $x+dx$ . Однако важно подчеркнуть, что эта наивная вероятностная интерпретация теряется при учете эффектов более высокого порядка в КХД. Зависимость ПДФ от доли импульса  $x$  определяется низкоэнергетической непертурбативной динамикой КХД, в котором сильная связь становится большой и пертурбативные расчеты не надежны. В результате возникает необходимость извлекать ПДФ из экспериментальных данных. Например, в процессе, в котором высокоэнергетический заряженный лептон, электрон или мюон, рассеиваясь на протоне, испускает виртуальный калибровочный бозон ( фотон  $A_\mu$  или  $Z_\mu^0$ -бозон), который взаимодействует с одним из кварков в протоне, например  $u$ -кварк. Сечение этого процесса схематически можно выразить выражением

$$\sigma_{eN \rightarrow eX}(Q) = \sigma_{\gamma^* u \rightarrow u}(Q) \otimes u(x, Q) \quad (6)$$

где  $Q$  связано с передачей импульса электрона протону, а  $\sigma(\gamma^* u \rightarrow u)(Q)$ - партонное сечение жесткого рассеяния фотонов на кварках, которое можно определить в теории возмущений, вычисляя соответствующую диаграмму квантовой электродинамики (КЭД). Благодаря теоремам факторизации и универсальности сильного взаимодействия можно определить ПДФ распределения для процессов заданного типа, таких как лептон-протонное рассеяние, а затем использовать те же ПДФ распределения для расчета предсказаний различных типов процессов в протон-протонном рассеянии. Рисунок 3 иллюстрирует применение этой универсальности ПДФ: на основании теорем факторизации КХД можно извлечь ПДФ протона из измерений глубоко неупругого рассеяния, а затем использовать те же ПДФ-распределения для оценки сечения образования электрослабых калибровочных  $Z_\mu^0, W_\mu^\pm$ -бозонов в протон-протонных соударениях Дрелл-Яна (см. рисунок 3). Так из уравнения (6) следует, что экспериментальные данные по измерению сечения  $\sigma(e\bar{p} \rightarrow eX)(Q)$  совместно с результатами пертурбативных вычислений сечения  $\sigma(\gamma^* u \rightarrow u)(Q)$  дают возможность извлечь ПДФ  $u(x; Q)$ -кварка.

#### 4. О кварковой и глюонной субструктурах протона

Заметим, что, хотя зависимость ПДФ от доли импульса  $x$  является непертурбативной, их зависимость от переданного импульса  $Q$  можно оценить в теории возмущений. Это может быть достигнуто с помощью уравнений эволюции DGLAP, которые принимают схематическую форму [4-6]

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

$$Q^2 \frac{\partial f_i(x, Q^2)}{\partial Q^2} = \sum_j^{n_f} P_{ij}(x, \alpha_s(Q^2)) \otimes f_j(x, Q^2), i=1, \dots, n_f \quad (7)$$

где  $n_f$  указывает на число активных партонов, участвующих в эволюции, а  $P_{ij}$  - пертурбативные ядра (функции расщепления).

Благодаря уравнениям ДГЛАП (7), определение партонной структуры нуклона на каком-то низком масштабе, скажем  $Q_0 = 1$  ГэВ, позволяет оценить поведение ПДФ для любого другого масштаба  $Q > Q_0$ . Функции расщепления  $P_{ij}$  могут быть либо неполяризованными, либо поляризованными и могут быть разложены в степенной ряд по  $\alpha_s$ ,

$$P_{ij} = \sum_{k=0} \alpha_s^{k+1} p^{(k)} \quad (8)$$

с коэффициентами  $p^{(k)}$ , вычисленными в пертурбативной КХД с точностью вплоть до NNLO. Поскольку коэффициенты партонных сечений в уравнении известны с точностью до NNLO для большинства неполяризованных процессов и до NLO для большинства поляризованных процессов, соответствующие ПДФ распределения могут быть определены только с этой точностью. Функции расщепления  $P_{ij}(x; \alpha_s(Q^2))$  моделируют вероятность того, что один из партонов в протоне (например, кварк или глюон) излучит другой партон в коллинеарном приближении.

Кроме ограничений, налагаемых эволюцией ДГЛАП, существуют дополнительные теоретические ограничения на поведение выбранных комбинаций ПДФ. В частности, сохранение

энергии-импульса налагает следующее правило сумм на импульсную зависимость партонных функций:

$$\int_0^1 x dx \left( \sum_i^{n_q} (f_i(x, Q^2) + \bar{f}_i(x, Q^2)) + f_g(x, Q^2) \right) = 1 \quad (9)$$

где  $n_q$  - количество активных кварков с массами  $m_{q_i} < Q$ . Сохранение ароматного числа приводит к правилам сумм числа кварков, например, для протона они принимают следующий вид:

$$\int_0^1 x dx (u(x, Q^2) - \bar{u}(x, Q^2)) = 2, \int_0^1 x dx (d(x, Q^2) - \bar{d}(x, Q^2)) = 1 \quad (10)$$

Объединив широкий диапазон экспериментальных измерений с участием протонных мишеней с современной теорией расчетов, становится возможным определение кварковой и глюонной субструктур протона.

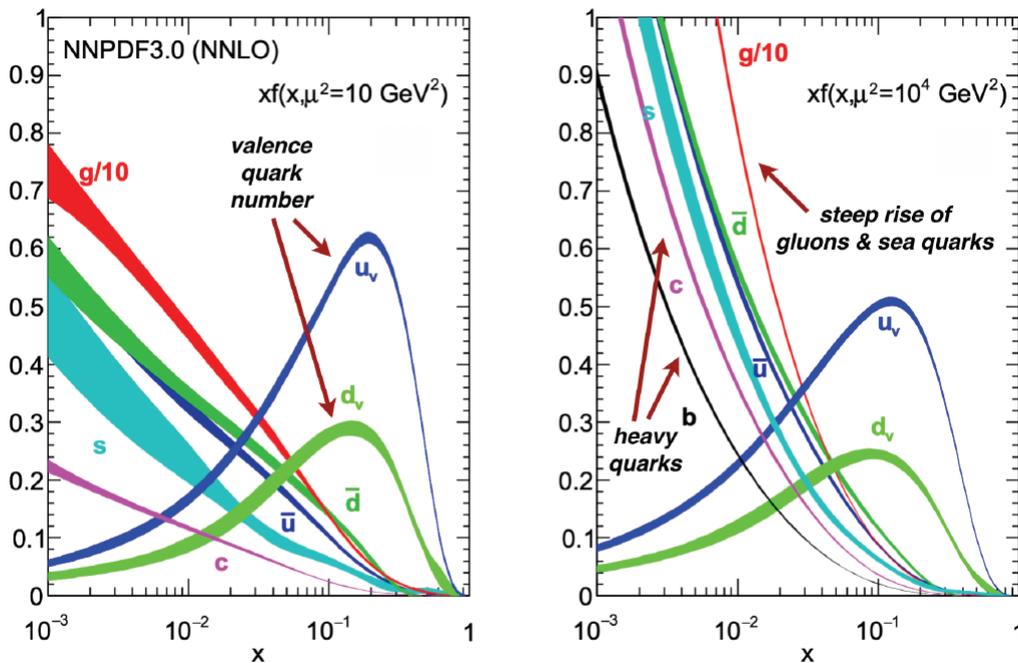
На рисунке 4 представлены примеры определения структуры протона на базе глобального анализа (см. [9]). На двух диаграммах, соответствующих двум различным масштабам,  $Q^2 = 10$  ГэВ<sup>2</sup> и  $10^4$  ГэВ<sup>2</sup>, приведены графики зависимости партонных функций распределения от доли партонного импульса  $x$  для валентных  $u_v$  и  $d_v$  кварков, определяемых как

$$u_v(x, Q^2) = u(x, Q^2) - \bar{u}(x, Q^2), \\ d_v(x, Q^2) = d(x, Q^2) - \bar{d}(x, Q^2),$$

для морских кварков

$$f_i(x, Q^2), \bar{f}_i(x, Q^2); i = u, d, s, c, b,$$

а также глюона  $f_g(x, Q^2)$ . Заметим, что зависимость ПДФ от масштаба  $Q$  полностью фиксируется пертурбативными эволюционными урав-



**Рис. 4.** Результаты глобального анализа в протоне [15] в форме зависимости от доли партонного импульса  $x$  для  $Q^2 = 10$  ГэВ<sup>2</sup> (слева) и для  $Q^2 = 10^4$  ГэВ<sup>2</sup> (справа) (см. рисунок в [5])

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

нениями ДГЛАП. Из *рисунка 4* видно, что общая форма распределений валентных кварков,  $u_v(x, Q^2)$  и  $d_v(x, Q^2)$ , согласуется с условием, что общее число валентных кварков в протоне равно двум для  $u$ -кварков и одному для  $d$  кварка, что является прямым следствием уравнения (10).

Кроме того, видно, что при больших значениях доли импульса  $x$  ПДФ валентных кварков являются преобладающими, а при меньших  $x$  доминируют его морские кварковые и глюонные компоненты. Действительно, при малых  $x$  наблюдается резкий рост числа глюонов и морских кварков, которые быстро доминируют над валентными распределениями, особенно при увеличении  $Q$ . При переходе от  $Q^2=10$  ГэВ<sup>2</sup> к  $Q^2=10^4$  ГэВ<sup>2</sup>, как это определено эволюционными уравнениями ДГЛАП, обнаруживается, что валентные кварки  $u_v$  и  $d_v$  относительно стабильны, в то время как компоненты глюонов и морских кварков сильно растут. Такое поведение означает, что чем выше энергия, при которой исследуется внутренняя структура протона, тем больше его глюонная компонента.

Глобальные распределения партонов, подобные представленным на *рисунке 4*, сыграли центральную роль в интерпретации экспериментальных измерений в лептон-адронных и адрон-адронных столкновениях и внесли один из важнейших теоретических вкладов, которые способствовали открытию в  $pp$ -столкновениях бозона Хиггса, ознаменовавшее новую эру физики элементарных частиц.

### 5. Кварк-глюонный статус спина протона

До появления квантовой хромодинамики (КХД) структура и масса адронов изучались в рамках нерелятивистской кварковой модели SU(6). Также, как и в других нерелятивистских системах, в которых полные спины электронного облака в атомах и спины ядер представляют собой векторные суммы спинов и орбитальных угловых моментов (ОУМ) своих составляющих, можно было предположить, что в кварковой ( $uud$ ) модели спин протона представляет собой сумму спинов трех валентных кварков. Стало полной неожиданностью, когда в экспериментах глубоко-неупругого рассеяния поляризованного мюона на поляризованном протоне было обнаружено, что спин кварка вносит очень малый вклад в спин протона [6]

$$\Delta\Sigma(Q^2 = 10 \text{ ГэВ}^2) = 0,060 \pm 0,047 \pm 0,069. \quad (11)$$

Так как успех моделирования нуклона в конституентной модели на основе квази-свободных валентных кварков предполагал, что только кварки вносят вклад в спин нуклона [6], то открытие (11) перевернуло общепринятое мне-

ние того времени и вызвало бурные дискуссии. Ввиду теоретического затруднения и отсутствия консенсуса в обществе это открытие спровоцировало «протонный спиновый кризис». Центральным вопросом разногласий заключался в интерпретации экспериментальных результатов. Является ли экспериментальный результат измерением только спина кварка или комбинации спина кварка и спина глюона. Обычно ожидалось, что излучаемые глюоны внесут вклад в спин нуклона, но лишь в виде небольшой поправки. В то время казалось разумным пренебречь глюонами, предсказывая тем самым ненулевой вклад в спин протона  $1/2$  от кваркового ОУМ. Небольшой вклад глюонов в спин нуклона также подразумевал бы небольшую роль морских кварков, так что тогда кварковый ОУМ можно было бы понимать как происходящий в основном от валентных кварков. Позднее происхождение кваркового ОУМ было понято релятивистской кинематикой кварков, заключенных в небольшой объем адронов.

Разложение спина и импульса протона по вкладам кварков и глюонов можно определить из прямых матричных элементов тензора энергии-импульса КХД. Существуют две основные формулировки разложения. Одной из них является разложение Джа-Манохара (см. [6])

$$J = 1/2\Delta\Sigma + L_q^{JM} + \Delta G + L_G; \quad (11)$$

где  $1/2\Delta\Sigma/G$  – вклад спина кварка/глюонов, а  $L_q^{JM}/L_G$  – вклад орбитального углового момента (ОУМ) кварка/глюона. Оно получено из канонического тензора энергии-импульса в системе светового конуса. Таким образом, этот подход зависит от калибровки и системы координат.

Другой вариант –  $J_i$ -разложение [6]

$$J = J_q + J_G = 1/2\Delta\Sigma + L_q^{Ji} + J_G; \quad (12)$$

где  $1/2\Delta\Sigma$  – тот же вклад спина кварка, что и в уравнении (11),  $L_q^{Ji}$  – кварк ОУМ, а  $J_G$  – угловой момент глюонов (УМ). Это выражение получается из тензора энергии-импульса и каждое слагаемое в уравнении калибровочно-инвариантно и не зависит от системы отсчета и может быть вычислено на решетке с локальными операторами. Партонная картина глюонного спина, получаемая из распределения спиральности глюонов, и орбитальный угловой момент (ОУМ) естественным образом описываются в формализме светового фронта, причем  $\Delta G$  извлекается из  $pp$ -столкновений при высоких энергиях, а ОУМ – из обобщенных партоновых распределений и распределения обобщенных поперечных импульсов [4-7].

С момента возникновения «кризиса спина протона» на решеточную КХД, возлагалась задача понимания происхождения незначительного

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

вклада спина кварков, решение которой было предложено в недавних расчетах на решетках (см. [6]). Они представляют собой современные расчеты вклада спина кварков для разных ароматов, в которых полный спин кварка, состоящий из двух вкладов  $u$ ;  $d$  и  $s$ -кварков, обусловленных различными возможностями учета аксиального тока см. [6]). Спин кварковый вклад можно получить из нуклонного матричного элемента флейвор-синглетного аксиально-векторного тока

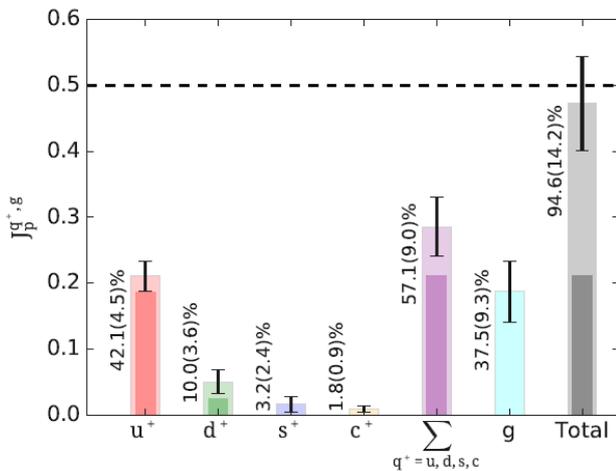
$$\langle p, s | J_\mu^0 | p, s \rangle = s_\mu g_J^0,$$

где  $J_\mu^0 = \sum_{f=u,d,s} \bar{\psi}_f i \gamma_\mu \gamma_5 \psi_f$ .  $s_\mu$  – вектор поляризации и  $g_J^0 = \Delta u + \Delta d + \Delta s$  – вклад  $u$ ,  $d$  и  $s$ -кварков в спин протона;  
 $\langle p, s | p', s \rangle = 2E_p V \delta_{pp'}$  – нормализация состояния нуклона.

Приведем общие результаты разложения спина протона по угловому моменту  $J_q$  для  $u$ ,  $d$ ,  $s$ -кварков и глюонному угловому моменту  $J_g$  в варианте  $J_i$  ([10] и разложению по спину кварка и его ароматным вкладам  $u$ ,  $d$  и  $s$ , глюону  $J_g$  и кварковому ОУМ [11]. Результаты по долям углового момента в уравнении (12) для  $u$ ,  $d$ ,  $s$ ,  $s$ -кварков и глюона показаны на *рисунке 5*.

Суммарный спин  $J_q$  составляет 57,1(9,0)%, а  $J_g$  – 37,5(9,3)% от общего значения углового момента  $J$ . Также рассчитан вклад спина кварков, который составляет  $1/2\Delta\Sigma = 0,191$ . Это дает ОУМ кварков, составляющий 18,8(10,2)(2)% от общего  $J$ . Другой расчет основан на перекрытии валентностей на доменной стенке фермионного моря на решетке  $32^3 \times 64$  с  $a = 1,43$  фм и массы пиона 171 МэВ при размере ящика 4,6 фм (см. *рисунки* [11]).

Результаты [11] по процентным вкладам  $\Delta\Sigma$ ,  $J_g$  и  $L_q^{ji}$  – 40(4)%, 46(5)% и 13(5)% соответственно



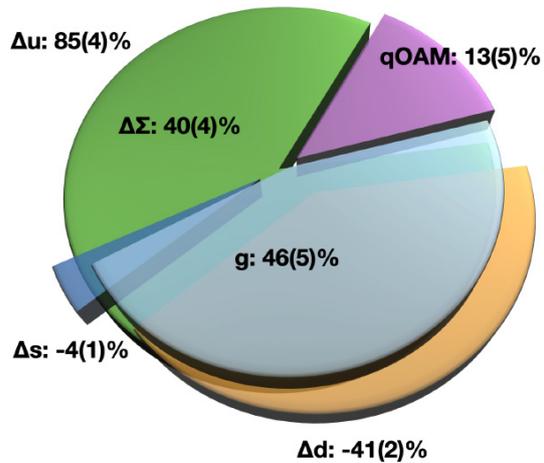
**Рис. 5.** Разложение (12) спина протона по угловому моменту  $J_q$  для  $u$ -;  $d$ - и  $s$ -кварков и глюонному угловому моменту  $J_g$ ,  $n_f = 2+1+1$  (см. *рисунок* в [10])

показаны на *рисунке 6*. Все эти результаты находятся в схеме МС при энергии 2 ГэВ. Заметим, что в рамках относительно больших погрешностей спиновых компонент результаты для обоих случаев согласуются в пределах указанных погрешностей.

## 6. От партонной динамики к квантовому запутыванию при высоких энергиях

Квантовая хромодинамика успешно описывает адронные явления на очень малых расстояниях с точки зрения взаимодействия кварков и глюонов, которые могут быть детально исследованы при высоких энергиях. На больших расстояниях из-за непертурбативной природы их структур многие частицы и их внутренние детали остаются загадкой. В частности, именно идеи квантования нуклона должны преодолеть разрыв между КХД и современным описанием структуры адронов. Простая модель кварков предполагает, что барионы (нуклоны) имеют три валентных кварка и море, содержащее глюоны и кварк-антикварковые конденсаты, влияние которого на свойства нуклонов еще не достаточно изучено. Спиновая структура протона является одним из ключевых примеров, подтверждающих наличие глюонов, которые вносят существенный вклад в спин протона.

Спиновая запутывание наблюдалось в самых разных системах и масштабах длины: от микроскопических до макроскопических. Однако такая запутанность остается в значительной степени неисследованной на самых высоких доступных энергетических уровнях. Недавно самый массивный из известных адронов, топ-кварк, была предложена в качестве новой лаборатории для изучения квантовой запутанности и кванто-



**Рис. 6.** Протон-спиновое разложение по кварковому спину  $\Delta\Sigma$ , флейворным вкладам  $\Delta u$ ,  $\Delta d$ ,  $\Delta s$ , глюонному  $J_g$  и кварковому ОУМ для случая  $n_f = 2 + 1$  (см. *рисунок* в [11])

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

вой информации [12]. Благодаря большой массе и короткому времени жизни, кварковые числа топ-кварка до своего распада не затуманены сильными взаимодействиями с другими частицы, и поэтому доступны для измерения через продукты его распада. Спин-корреляция между топ-кварком и антитоп-кварком может быть использована в событиях протон-протонных ( $pp$ ) столкновениях для исследования эффектов квантовой запутанности. Запутанность в парах топ-кварков можно наблюдать по увеличению силы их спиновых корреляций. Из-за короткого времени жизни топ-кварки не могут быть обнаружены непосредственно в экспериментах. В СМ они распадаются почти исключительно на  $b$ -кварк и  $W^\pm$ -бозон, а  $W^\pm$ -бозон впоследствии распадается либо на пару более легких кварков или заряженный лептон и нейтрино. В этом измерении заряженные лептоны, электроны и мюоны, от распадов  $W$ -бозонов могут быть обнаружены с высокой точностью, в результате, эти лептоны в хорошем приближении несут спиновую информацию своих родительских топ-кварков.

### Литература

1. Смуров С.В., Волков Г.Г., Столбов С.Н., Царьков А.Н. Новые симметрии многомерной геометрии в квантовой физике и квантовой информации // Известия Института инженерной физики, 2020. №3(57). С.85-94.
2. Волков Г.Г., Смуров С.В. Об исключительных особенностях мультинарных комплексных неабелевых алгебрах // Известия Института инженерной физики, №4(62). С.60-68.
3. G. Volkov. Ternary «Quaternions» and Ternary  $TU(3)$  algebra// arXiv: 1006.5627 (2010).
4. A. Deur, S. J. Brodsky, G.F. de Teramond. The Spin Structure of the Nucleon // arXiv:1807.05250v3 [hep-ph] 24 Apr 2019.
5. Juan Rojo. The Partonic Content of Nucleons and Nuclei // arXiv: 1910.03408v2 [hep-ph] 25 Feb 2020.
6. Keh-Fei Liu, Status on Lattice Calculations of the Proton Spin Decomposition // arXiv: 2112.08416v2 [hep-lat] 26 Apr 2022.
7. Jacob J. Ethier and Emanuele R. Nocera Parton Distributions in Nucleons and Nuclei // Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 2020. 70:43–76.
8. R.K. Ellis, H. Georgi, M. Machacek, H.D. Politzer and G.G. Ross / Factorization and the parton model in QCD // Phys. Lett. 78B, 281 (1978); /Perturbation theory and the parton model in QCD//Nucl. Phys. B 152, 285 (1979).
9. Ball, R. D. et al. (2015). Parton distributions for the LHC Run II// JHEP,04:040, 1410.8849. arXiv:2112.08416v2 [hep-lat] 26 Apr 2022.
10. C. Alexandrou, S. Bacchio, M. Constantinou, J. Finkenrath, K. Hadjiyiannakou, K. Jansen, G. Koutsou, H. Panagopoulos, and G. Spanoudes. Complete avor decomposition of the spin and momentum fraction of the proton using lattice QCD simulations at physical pion mass // Phys. Rev. D, 101(9):094513, 2020.
11. Gen Wang, Yi-Bo Yang, Jian Liang, Terrence Draper, and Keh-Fei Liu. Proton momentum and angular momentum decompositions with overlap fermions // [arXiv: 2111.09329] 2021.
12. The ATLAS Collaboration, Observation of quantum entanglement in top-quark pairs using the ATLAS detector// arXiv:2311.07288v2 [hep-ex] 17 Nov 2023.



# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК.62-52

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СИСТЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ РАКЕТ И АНАЛИЗ ИХ УСТОЙЧИВОСТИ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ТЕКУЩИМИ И КОНЕЧНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ MATHEMATICAL MODELS OF BALLISTIC MISSILE STABILIZATION SYSTEMS AND ANALYSIS OF THEIR STABILITY WHEN CONTROLLING CURRENT AND FINAL PARAMETERS

**Елена Юрьевна Пушкарёва**

доктор технических наук, профессор  
профессор кафедры «Системы управления ракет»  
филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17  
Тел.: 8 (915) 192-74-39  
E-mail: calgon100@yandex.ru

**Дмитрий Юрьевич Мельник**

адъюнкт кафедры «Системы управления ракет»  
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

Предложены математические модели систем стабилизации баллистических ракет (БР) для исследования устойчивости в следящем и терминальном режимах работы. При анализе устойчивости данных систем в следящем режиме они рассматриваются как системы управления текущими параметрами (СУТП), а при анализе их в терминальном режиме – как системы управления конечными параметрами (СУКП). Предложены методы построения систем стабилизации БР в классе комбинированных систем и эквивалентных им, позволяющие разрешить противоречие между точностью и устойчивостью.

**Ключевые слова:** баллистическая ракета; система управления; угол тангажа; центр масс; функциональная схема; структурная схема, математическая модель.

### Summary

Mathematical models of ballistic missile (BM) stabilization systems are proposed to study stability in tracking and terminal operating modes. When analyzing the stability of these systems in tracking mode, they are considered as current parameter control systems (CPCS), and when analyzing them in terminal mode, as finite parameter control systems (FPCS). Methods are proposed for constructing ballistic missile stabilization systems in the class of combined systems and equivalent ones, allowing to resolve the contradiction between accuracy and stability.

**Keywords:** ballistic missile; control system; pitch angle; center of mass; functional diagram; block diagram, mathematical model.

### Введение

Повышение точности систем стабилизации баллистических ракет (БР) связано с рядом задач наведения и управления как центром масс, так и угловыми движениями относительно его. Более подробно об этих и других задачах показано в [1,2,3].

Задача точности стабилизации углового движения БР относительно центра масс решается с помощью управления текущими параметрами. В данной статье рассмотрено управление текущими параметрами контура угловой стабилизации.

Следует заметить, что особое место занимают задачи слежения и задачи терминального управления БР. От их корректного решения во

многом зависит как точность наведения, так и устойчивость движения.

Здесь важное актуальное место занимают терминальные задачи автоматического управления, при решении которых необходимо в конечной точке выполнить конечные условия по координатам и по скоростям, а также по заданному времени прибытия в конечную (терминальную) точку. В данной статье рассмотрено управление конечными параметрами контура нормальной стабилизации.

Необходимость выполнения данных требований при решении задач отделения головных частей (полезной нагрузки) от БР рассмотрена в [1,3].

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Там же показано, что высокая точность терминального управления достигается путем увеличения как точности регулирования объектом управления, так и путем увеличения точности при воспроизведении программного значения положения центра масс данного объекта.

Целью статьи является разработка математических моделей систем стабилизации БР в классах замкнутых и комбинированных систем автоматического управления для проведения исследований процессов устойчивости и качества движения.

### Математические модели и анализ устойчивости систем стабилизации баллистических ракет (БР) при управлении текущими параметрами (СУТП)

Существующие системы стабилизации, как правило, рассматриваются в классе замкнутых систем автоматического управления (САУ). Наиболее распространенная такая САУ приведена на *рисунке 1*.

В приведенной системе реализуется текущее управление углом тангажа  $\vartheta$  и центром масс по линейной координате  $y$ . На данной схеме введены следующие обозначения: ДУД – динамика углового движения в тангажной плоскости; ДЦМ – динамика линейного перемещения центра масс; ИУ $_{\vartheta}$  – измерительное устройство угла тангажа; ИУ $_y$  – измерительное устройство положения центра масс (по линейной координате  $y(t)$ ); РП – ру-

левой привод;  $Рег^{\vartheta}$  – регулятор замкнутой автоматической системы стабилизации по углу тангажа;  $Рег^y$  – регулятор замкнутой автоматической системы стабилизации по центру масс.

Следует выделить два контура:

- контур нормальной стабилизации, включающий в себя блоки, ДУД, ДЦМ, ИУ $_y$ ,  $Рег^y$ , РП;
- контур угловой стабилизации с блоками ДУД, ИУ $_{\vartheta}$ ,  $Рег^{\vartheta}$ , РП.

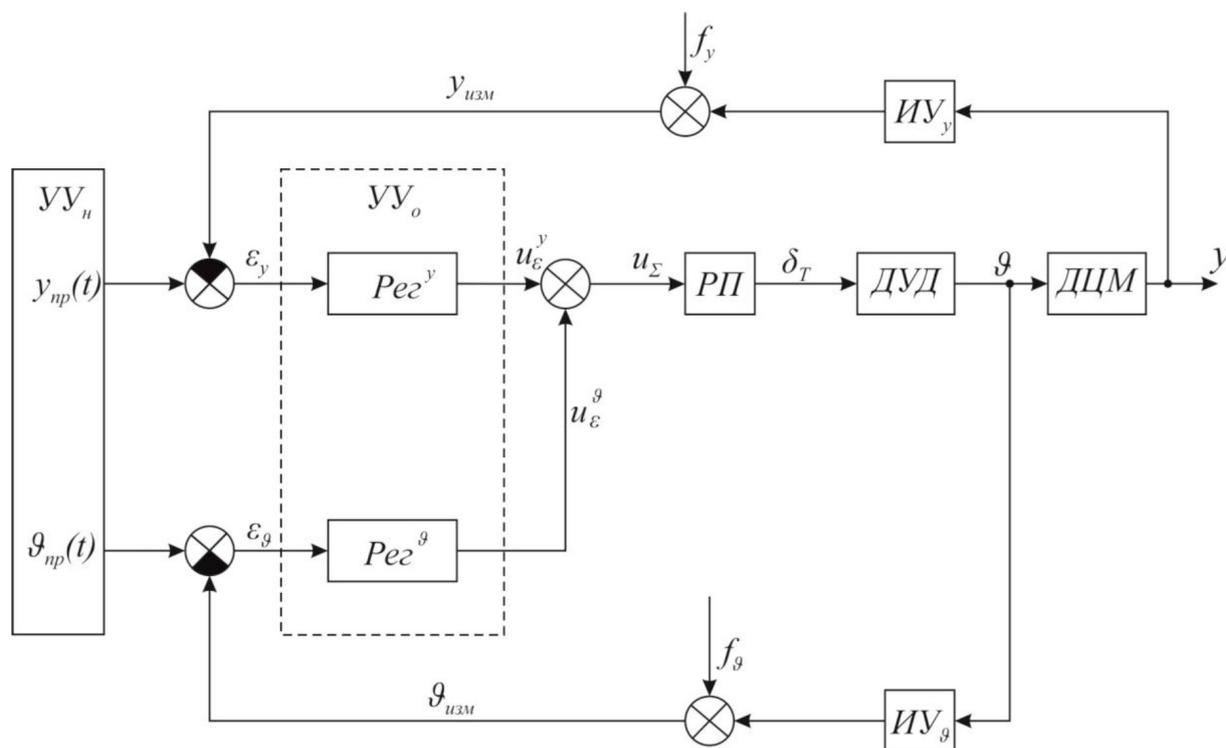
Соответствующие параметры и процессы управления в замкнутой САУ также представлены на *рисунке 1*:  $\varepsilon_{\vartheta}$  – ошибка управления углом тангажа  $\vartheta$ ;  $\varepsilon_y$  – ошибка управления центром масс;  $u_{\varepsilon}^y$  – управление центром масс по ошибке  $\varepsilon_y$ ;  $u_{\varepsilon}^{\vartheta}$  – управление углом тангажа по ошибке  $\varepsilon_{\vartheta}$ ;  $u_{\Sigma}$  – суммарное управление;  $\delta_T$  – угол отклонения БР по тангажу;  $f_{\vartheta}$  и  $f_y$  – возмущающие воздействия по углу тангажа  $\vartheta$  и координате  $y$  соответственно;  $\vartheta_{изм}$  и  $y_{изм}$  – измеренные значения угла тангажа  $\vartheta$  и координаты  $y$  соответственно;  $\vartheta_{np}$  и  $y_{np}$  – программные значения угла тангажа и координаты  $y$  соответственно.

Для анализа устойчивости ограничимся контуром угловой стабилизации (*рисунком 2*).

Если принять  $f_{\vartheta}=0$ , и обозначить передаточные функции как:

$$W_{Рег^{\vartheta}}(P) = \frac{B_1^{\vartheta}(P)}{A_1^{\vartheta}(P)}, W_{РП}(P) = \frac{K_{РП}}{T_{РП}P+1}, W_{ДУД}(P) = \frac{K_{ДУД}}{T_{ДУД}P^2+1}, W_{ИУ}(P) = K_{ИУ},$$

где  $B_1^{\vartheta}$  и  $A_1^{\vartheta}$  – полиномы числителя и знаменателя передаточной функции  $W_{Рег^{\vartheta}}$  регулятора соответственно;



**Рис. 1.** Функциональная схема замкнутой системы стабилизации БР в тангажной плоскости

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

$W_{PP}$  – передаточная функция рулевого привода;  
 $W_{ДУД}$  – передаточная функция блока динамики  
 углового движения БР в тангажной плоскости;  
 $W_{ИУ}$  – передаточная функция измерительного  
 устройства, то структурная схема контура угло-  
 вой стабилизации примет вид (рисунки 3).

Передаточная функция разомкнутой одно-  
 контурной САУ примет вид

$$W_p(P) = W_{рег}^\theta(P) W_{PP}(P) W_{ДУД}(P) = \frac{B_1^\theta(P) K_{PP} K_{ДУД}}{A_1^\theta(P) (T_{PP} P + 1) (T_{ДУД} P^2 + 1)}, \quad (2)$$

а передаточная функция обратной связи

$$W_{OC}(P) = W_{ИУ}(P) = K_{ИУ}. \quad (3)$$

Передаточная функция по ошибке  $W_\varepsilon(P)$   
 определяется через передаточную функцию раз-  
 разомкнутой САУ как

$$W_\varepsilon(P) = \frac{1}{1 + W_p(P) W_{OC}(P)}. \quad (4)$$

Поэтому с учетом (2) и (3) имеем

$$W_\varepsilon(P) = \frac{A_1^\theta(P) (T_{PP} P + 1) (T_{ДУД} P^2 + 1)}{A_1^\theta(P) (T_{PP} P + 1) (T_{ДУД} P^2 + 1) + B_1^\theta(P) K_{PP} K_{ДУД} K_{ИУ}}, \quad (5)$$

Известно, что для достижения инвариантно-  
 сти (независимости) ошибки  $\varepsilon$  от воздействия  $\mathcal{G}_{np}$   
 необходимо, чтобы

$$A_1^\theta(P) (T_{PP} P + 1) (T_{ДУД} P^2 + 1) = 0.$$

Однако каждый из сомножителей входит  
 в знаменатель выражения (5), т.е. входит в ха-  
 рактеристическое уравнение замкнутой САУ.  
 Поэтому изменение этих полиномов с целью  
 повышения точности (выполнения условий ин-  
 вариантности) приводит к изменению корней  
 характеристического уравнения, т.е. к нару-  
 шению устойчивости. Следовательно, согласно  
 принципу двухканальности академика Б.Н. Пе-  
 трова, в одноконтурной системе с принципом  
 управления по отклонению невозможно повы-  
 шение точности без нарушения устойчивости.  
 Поэтому необходимо добавить второй канал  
 передачи входного воздействия, и реализовать  
 вторую форму достижения инвариантности, в  
 которой полином числителя будет представлять  
 собой разность двух полиномов.

Рассмотрим структурную схему комбини-  
 рованного управления контуром угловой ста-  
 билизации, представленную на рисунке 4.

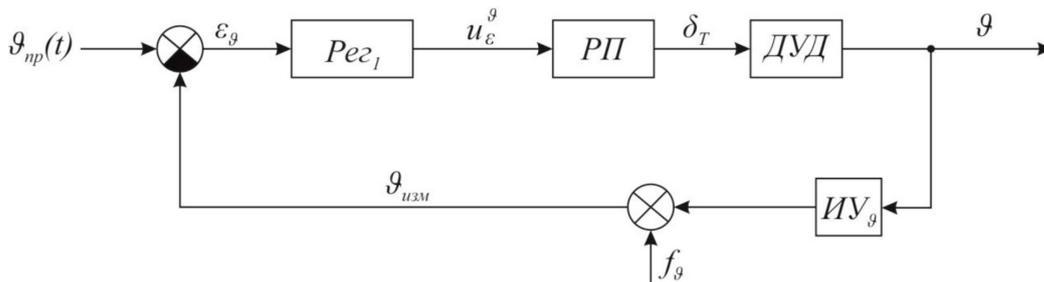


Рис. 2. Функциональная схема контура угловой стабилизации

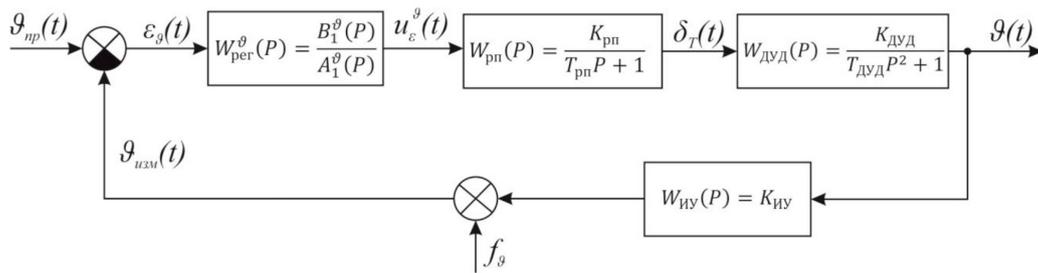


Рис. 3. Структурная схема контура угловой стабилизации

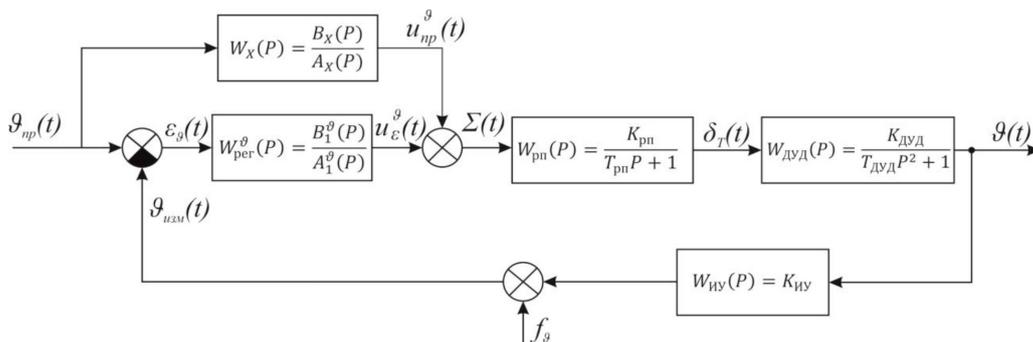


Рис. 4. Структурная схема комбинированного управления контуром угловой стабилизации

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

При  $f_g=0$  уравнения динамики будут иметь следующий вид

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_g(P) &= \mathcal{G}_{np}(P) - \mathcal{G}(P)W_{ИУ}(P) \\ \Sigma(P) &= \varepsilon_g(P)W_{Pec}^g(P) + \mathcal{G}_{np}(P)W_X(P) \\ \mathcal{G}(P) &= \Sigma(P)W_{РП}(P)W_{ДУД}(P) \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

Исключая  $\Sigma(P)$  и  $\mathcal{G}(P)$ , получим

$$\varepsilon_g(P) = \mathcal{G}_{np}(P) - [\varepsilon_g(P)W_{Pec}^g(P) + \mathcal{G}_{np}(P)W_X(P)]W_{ИУ}(P)W_{РП}(P)W_{ДУД}(P), \quad (7)$$

или

$$\begin{aligned} \varepsilon_g(P)[1 + W_{Pec}^g(P)W_{ИУ}(P)W_{РП}(P)W_{ДУД}(P)] &= \\ = \mathcal{G}_{np}(P)[1 - W_X(P)W_{ИУ}(P)W_{РП}(P)W_{ДУД}(P)]. \end{aligned} \quad (8)$$

Откуда имеем выражение для передаточной функции по ошибке

$$W_\varepsilon(P) = \frac{\varepsilon_g(P)}{\mathcal{G}_{np}(P)} = \frac{1 - W_X(P)W_{ИУ}(P)W_{РП}(P)W_{ДУД}(P)}{1 + W_{Pec}^g(P)W_{ИУ}(P)W_{РП}(P)W_{ДУД}(P)}. \quad (9)$$

Для выполнения условия инвариантности необходимо иметь

$$1 - W_X(P)W_{ИУ}(P)W_{РП}(P)W_{ДУД}(P) = 0. \quad (10)$$

Условие (10) будет выполнено, если передаточная функция  $W_X(P)$  связи по задающему воздействию будет обратна произведению передаточных функций  $W_{ИУ}(P)$ ,  $W_{РП}(P)$ ,  $W_{ДУД}(P)$ , т.е.

$$W_X(P) = \frac{1}{W_{ИУ}(P)W_{РП}(P)W_{ДУД}(P)} = \frac{(T_{РП}P + 1)(T_{ДУД}P^2 + 1)}{K_{РП}K_{ДУД}K_{ИУ}} \quad (11)$$

Выражение (11) является условием абсолютной инвариантности для контура угловой стабилизации, представленном на *рисунке 4*.

Если выразить передаточные функции через соответствующие полиномы (см. *рисунк 4*) и подставить их в выражение (9) то получим

$$W_\varepsilon(P) = \frac{[A_X(P)(T_{РП}P + 1)(T_{ДУД}P^2 + 1) - B_X(P)K_{РП}K_{ДУД}K_{ИУ}]A_1^g(P)}{[A_1^g(P)(T_{РП}P + 1)(T_{ДУД}P^2 + 1) + B_1^g(P)K_{РП}K_{ДУД}K_{ИУ}]A_X(P)} \quad (12)$$

Так как  $A_1^g(P) \neq 0$ , то условие абсолютной инвариантности примет вид

$$A_X(P)(T_{РП}P + 1)(T_{ДУД}P^2 + 1) - B_X(P)K_{РП}K_{ДУД}K_{ИУ} = 0, \quad (13)$$

а характеристическое уравнение

$$A_1^g(P)(T_{РП}P + 1)(T_{ДУД}P^2 + 1) + B_1^g(P)K_{РП}K_{ДУД}K_{ИУ}. \quad (14)$$

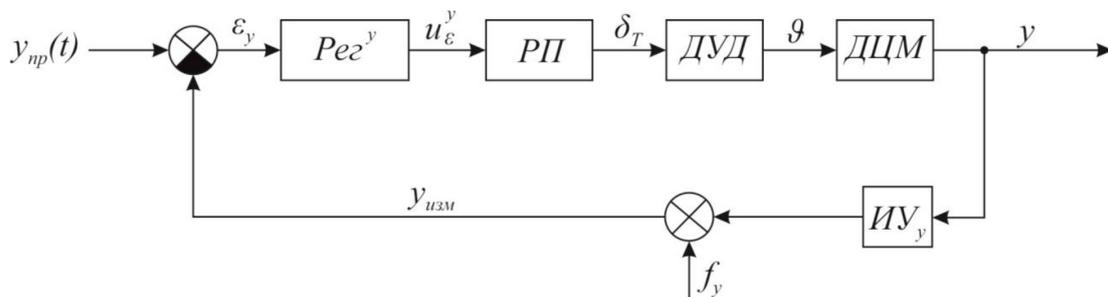
Из (13) следует, что полином  $B_X(P)$  входит только в условие инвариантности, а характеристический полином не зависит от него. Поэтому выбор полинома  $B_X(P)$  не влияет на устойчивость комбинированной системы.

Так как полином  $A_X(P)$  входит в характеристический полином в виде множителя, то связь по задающему воздействию не изменяет корней замкнутой части контура и тем самым не влияет на его устойчивость, а вносит новые корни, соответствующие уравнению  $A_X(P) = 0$ . Эти корни определяют устойчивость разомкнутой части контура угловой стабилизации. Так как проблема устойчивости обычно возникает в замкнутых системах, то с помощью полинома  $A_X(P)$  можно добиться выполнения условий инвариантности.

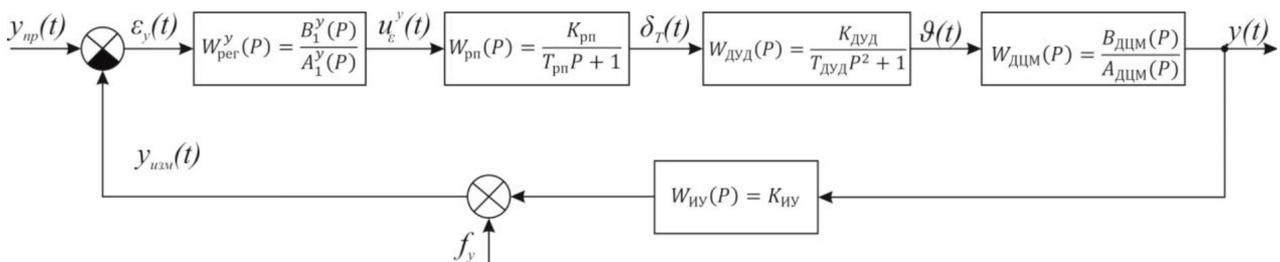
### Математические модели и анализ устойчивости систем стабилизации баллистических ракет при управлении конечными параметрами

Управление конечными параметрами будем осуществлять в контуре нормальной стабилизации (*рисунк 5*).

С учетом выражения (1), и обозначая передаточную функцию  $W_{Pec}^y(P)$  аналогично передаточной функции  $W_{Pec}^g(P)$ , получим структурную схему контура нормальной стабилизации (*рисунк 6*).



**Рис. 5.** Функциональная схема контура нормальной стабилизации



**Рис. 6.** Структурная схема контура нормальной стабилизации

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Найдя передаточные функции разомкнутого контура  $W_p(P)$  и контура обратной связи  $W_{oc}(P)$  а также принимая во внимание выражение (4), получим передаточную функцию по ошибке для данной схемы.

$$W_\varepsilon(P) = \frac{A_1^y(P)A_{дцм}(P)(T_{рп}P+1)(T_{дуд}P^2+1)}{A_1^y(P)(T_{рп}P+1)(T_{дуд}P^2+1) + B_1^y(P)A_{дцм}(P)K_{рп}K_{дуд}K_{иу}}. \quad (15)$$

Для достижения инвариантности (независимости) ошибки  $\varepsilon$  от воздействия  $y_{np}$  необходимо, чтобы

$$A_1^y(P)A_{дцм}(P)(T_{рп}P+1)(T_{дуд}P^2+1) = 0.$$

Однако каждый из сомножителей также входит в знаменатель выражения (15). Следовательно, их изменение с целью повышения точности приводит к нарушению устойчивости.

Для достижения третьей терминальной формы (ТТФ) инвариантности необходимо добавить еще один канал передачи входного воздействия. Он должен содержать в себе два блока, как показано на рисунке 7: инвертор с передаточной функцией

$$W_{инв}(P) = \frac{1}{W_{иу}(P)W_{рп}(P)W_{дуд}(P)W_{дцм}(P)}, \quad (16)$$

и регулятор терминального управления с передаточной функцией

$$W_X(P, t, t_k) = \frac{B_X(P, t, t_k)}{A_X(P)}. \quad (17)$$

При  $f_y = 0$  уравнения динамики примут следующий вид

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_y(P, t, t_k) &= y_{np}(P) - y(P)W_{иу}(P) \\ \Sigma(P) &= \varepsilon_y(P, t, t_k)W_{рег}^y(P) + y_{np}(P)W_X(P, t, t_k)W_{инв}(P) \\ y(P) &= \Sigma(P)W_{рп}(P)W_{дуд}(P)W_{дцм}(P) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Исключая  $\Sigma(P)$  и  $y(P)$  получим

$$\varepsilon_y(P, t, t_k) \left[ 1 + W_{рег}^y(P)W_{иу}(P)W_{рп}(P)W_{дуд}(P)W_{дцм}(P) \right] = y_{np}(P) \left[ 1 - W_X(P, t, t_k)W_{инв}(P)W_{иу}(P)W_{рп}(P)W_{дуд}(P) \right]. \quad (19)$$

Отсюда имеем выражение для ошибки контура нормальной стабилизации

$$\varepsilon_y(P, t, t_k) = \frac{1 - W_X(P, t, t_k)W_{инв}(P)W_{иу}(P)W_{рп}(P)W_{дуд}(P)W_{дцм}(P)}{1 + W_{рег}^y(P)W_{иу}(P)W_{рп}(P)W_{дуд}(P)W_{дцм}(P)} y_{np}(P). \quad (20)$$

Принимая во внимание выражение (16), получим

$$\varepsilon_y(P, t, t_k) = \frac{1 - W_X(P, t, t_k)}{1 + W_{рег}^y(P)W_{иу}(P)W_{рп}(P)W_{дуд}(P)W_{дцм}(P)} y_{np}(P). \quad (21)$$

Если выразить (21) через соответствующие полиномы (см. рисунок 7), тогда выражение для ошибки примет вид

$$\varepsilon_y(P, t, t_k) = \frac{[A_X(P) - B_X(P, t, t_k)]A_1^y(P)A_{дцм}(P)(T_{рп}P+1)(T_{дуд}P^2+1)}{[A_1^y(P)A_{дцм}(P)(T_{рп}P+1)(T_{дуд}P^2+1) + B_1^y(P)B_{дцм}(P)K_{рп}K_{дуд}K_{иу}]A_X(P)} y_{np}(P). \quad (21)$$

Из анализа выражения (22) следует, что полином  $B_X(P, t, t_k)$  входит только в условие инвариантности, а характеристический полином от него не зависит, поэтому выбор полинома  $B_X(P, t, t_k)$  не влияет на устойчивость контура нормальной стабилизации. Так как полином  $A_X(P)$  входит в характеристический полином в виде сомножителя, то связь по задающему воздействию не изменяет корней замкнутой части контура нормальной стабилизации, а соответственно не влияет на его устойчивость.

Третья терминальная форма инвариантности, гарантирующая нулевую ошибку  $\varepsilon$  в момент времени  $t=t_k$  при входном воздействии  $y_{np}(P)$ , примет вид

$$[A_X(P) - B_X(P, t, t_k)]y_{np}(P) = 0, \text{ при } t = t_k.$$

Полученное выражение является основой для расчета структуры полиномов  $A_X(P)$  и  $B_X(P, t, t_k)$ , а также их коэффициентов (параметров), т.е. передаточной функции  $W_X(P, t, t_k)$ , из условий выполнения требований (23).

### Заключение

По совокупности проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1) полученные функциональные и структурные схемы систем стабилизации баллистических ракет в тангажной плоскости в классе замкнутых и комбинированных систем автоматического управления показали, что системы комбинированного вида являются более приемлемыми для построения систем стабилизации БР, т.к. в них отсутствует противоречие между точностью и устойчивостью;

2) методическим аппаратом повышения точности систем стабилизации угловым положением без потери устойчивости является теория инва-

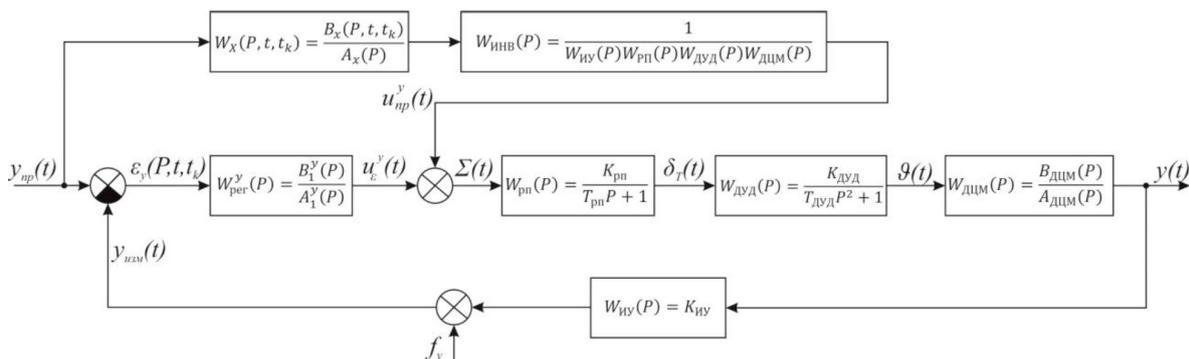


Рис. 7. Структурная схема комбинированного управления контуром нормальной стабилизации

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

риантности и комбинированное управление. Наличие второго регулятора со связью с заданным программным значением угла тангажа приводит к инвариантности ошибки управления углом тангажа (т.е. опять же к повышению точности);

3) использование комбинированного управления в системе стабилизации центра масс приводит к выполнению терминальных условий по координате и по скорости без потери устойчивости в конечной точке управления; для достижения этого в комбинированной системе стабилизации центра масс (рисунк 7) имеется терминальный регулятор со связью с программным линейным перемещением, параметры которого зависят от конечного и оставшегося времени.

### Литература

1. Разорёнов Г.Н. Теория и системы оптимального управления / Г.Н. Разорёнов, А.А. Самарин. М.: МО РФ, 2007. 472 с.
2. Разорёнов Г.Н. Лекции по механике полёта баллистических ракет. М.: Машиностроение – Полёт», 2019. 563 с.
3. Николаев Ю.М. Инженерное проектирование управляемых баллистических ракет с РДТТ / Ю.М.Николаев, Ю.С.Соломонов. М.: Воениздат МО СССР, 1979. 239 с.
4. Методы современной теории автоматического управления // Под общей ред. К.А. Пупкова. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 747 с.
5. Пушкарёв Ю.А. Критерий достижения инвариантности в детерминированных системах управления движением объектами / Ю.А. Пушкарёв, В.А. Родыгин. М.: Наука. Известия РАН, 2011. №4. С.37-47.
6. Пушкарёв Ю.А., Пушкарёва Е.Ю. Задачи и методы синтеза следящих и терминальных систем автоматического управления в ракетно-космической технике. М.: Машиностроение. Издательство «Полет», 2022. 647 с.



# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ



УДК 004.7.056

## СРЕДА ПОДДЕРЖКИ АВТОНОМНЫХ АГЕНТОВ ЗАЩИТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИ ОБОСОБЛЕННЫХ КРИТИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ИНФРАСТРУКТУР ENVIRONMENT FOR SUPPORTING AUTONOMOUS AGENTS FOR PROTECTING TECHNOLOGICALLY ISOLATED CRITICAL INFORMATION INFRASTRUCTURES

**Сергей Дмитриевич Ерохин**

кандидат технических наук, доцент  
ректор  
Московский технический университет  
связи и информатики (МТУСИ)  
Адрес: 111024, Москва, Авиамоторная, 8а  
Тел. +7 (495) 673-36-25  
E-mail: esd@mtuci.ru

**Андрей Николаевич Петухов**

кандидат технических наук, доцент  
начальник отдела  
МТУСИ  
Адрес: 111024, Москва, Авиамоторная, 8а  
Тел. +7 (495) 673-36-25  
E-mail: anpetukhov@yandex.ru

**Павел Львович Пилюгин**

кандидат технических наук  
старший научный сотрудник  
МТУСИ  
Адрес: 111024, Москва, Авиамоторная, 8а  
Тел. +7 (495) 673-36-25  
E-mail: ppl@mail.ru

**Андрей Петрович Лабазников**

кандидат технических наук  
военнослужащий

**Роман Леонидович Мусатов**

кандидат технических наук  
помощник Президента – начальник РИО  
АНО «Институт инженерной физики»  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7 (4967) 35-31-93  
E-mail: mrl1964@mail.ru

### Аннотация

В статье обсуждается построение программной среды поддержки автономных агентов защиты, обеспечивающих независимость их программного кода от конкретной платформы средств защиты технологически обособленных критических информационных инфраструктур. Анализируются основные факторы, препятствующие непосредственному перенесению кода агента между различными платформами: разнообразие и несогласованность интерфейсов и тесная взаимосвязь функций агента и платформы. Предлагается использование среды поддержки агентов защиты, обеспечивающей инвариантную трансляцию данных между агентами и платформой средств защиты. Устанавливается структура функционального расположения и связей между компонентами среды поддержки, определяется номенклатура, внутреннее наполнение и роль сегментов архитектуры.

**Ключевые слова:** информационная безопасность, критические информационные инфраструктуры, агенты защиты, среда поддержки, переносимость прикладных программ.

### Summary

The article discusses the construction of a software environment to support autonomous protection agents, ensuring the independence of their program code from a specific platform of protection tools for technologically isolated critical information infrastructures. The main factors preventing the direct transfer of agent code between different platforms are analyzed: the variety and inconsistency of interfaces and the close relationship between the functions of the agent and the platform. It is proposed to use a protection agent support environment that provides invariant data translation between agents and the protection platform. The structure of the functional location and connections between the components of the support environment is established, the nomenclature, internal content and the role of the architecture segments are determined.

**Keywords:** information security, critical information infrastructures, protection agents, support environment, application program portability.

### Введение

Современные критические информационные инфраструктуры (КИИ) обычно разрабатываются для специфического набора требований, что приводит к уникальности функциональной кон-

струкции и подходящей для нее единственной платформы средств защиты. В технологически обособленных КИИ, для которых могут быть недоступны каналы внешнего управления или требуемое время реакции слишком мало, чтобы,

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

чтобы дожидаться отклика этого управления, необходимо обеспечить возможность автономного и независимого от платформы функционирования. Кроме того, асимптотическое управление безопасностью КИИ, включающее контур адаптации, предполагает самостоятельное выполнение коррекций параметров и настроек средств защиты, а также изменение алгоритмов детектирования компьютерных атак, в том числе, и использующих машинное обучение и реализованных с привлечением искусственных нейросетей.

Архитектура высокоуровневых функций агентов защиты и соответствующие им компоненты асимптотического управления безопасностью КИИ [1] предполагают инвариантность по отношению к используемой платформе и устойчивости при изменениях среды функционирования. Эти свойства позволяют уменьшить нежелательные побочные эффекты использования агентов защиты, включая продолжительные сроки разработки, громоздкие процессы модернизации, отсутствие повторного использования аппаратных средств и программного обеспечения (ПО) при переходе между различными платформами. Кроме того, независимая и инкапсулированная реализация агентов защиты, снабженных необходимым инструментарием интерфейсов и описаний событий безопасности, создает дополнительные предпосылки для адаптации этих агентов при детектировании компьютерных атак и индикации инцидентов безопасности КИИ. Поэтому актуальным представляется решение задачи построения платформо-независимых агентов защиты в технологически обособленных КИИ.

В современных работах, посвященных исследованию агентов защиты [2,3], основные акценты сделаны на состав и содержание внутренних функций безопасности. Мы ограничим спектр рассматриваемых функций и далее, говоря об агентах защиты, будем иметь в виду программные компоненты, выполняющие коррекцию настроек и конфигураций сервисов безопасности, составляющих платформу. Такая коррекция предусмотрена адаптивным контуром асимптотического управления, и ее необходимость вызывается прогнозируемым (на основании детектирования компьютерной атаки) или произошедшим инцидентом. Информация об этих событиях безопасности поступает агенту из источников прогностического контура и/или внешних контакторов контура взаимодействия, например, НКЦКИ ГосСОПКА; оба эти контура являются архитектурными элементами асимптотического управления безопасностью КИИ.

Таким образом, в составе агента можно выделить следующие группы функций:

- функции представления событий безопасности, вход сигналов об атаках и инцидентах;
- функции анализа защищенности, выработка содержания коррекции;
- функции воздействия на механизмы защиты, изменение настроек и конфигураций.

Решением поставленной задачи может быть разработка среды поддержки переносимого ПО, учитывающей условия функционирования автономных агентов защиты и обеспечивающей их необходимыми интерфейсами. Принятое ограничение функциональности агента не снижает общности используемого подхода, который предполагает многократное использование ПО агентов и включает нескольких компонентов:

- информационные процессы для коррекции параметров и характеристик механизмов и средств защиты (могут выполняться как реакция на индцированный или прогнозируемый инцидент в составе адаптивного контура асимптотического управления [6]);
- спецификации полнофункциональных интерфейсов используемого ПО агентов защиты для поддержки процессов разработки и внедрения компонентов многократно используемого и платформо-независимого ПО;
- поддержку совместного функционирования вычислительной среды и ПО агентов защиты, переносимых между различными архитектурами технологически обособленных КИИ.

Используемый подход позволяет разрабатывать функции ПО в виде модулей, которые открыты для других программных компонентов за счет определенных интерфейсов. Он также обеспечивает многократное использование ПО агентов защиты в вычислительных средах на базе различных аппаратных платформ.

В статье приводится обзор архитектуры и интерфейсов вычислительной среды для функционирования ПО агентов защиты технологически обособленных КИИ.

### **Барьеры переносимости автономных агентов**

Стратегия среды поддержки агентов защиты состоит в создании условий, которые позволят развертывать агенты на различных платформах с минимальным влиянием на функционирование ПО установленных средств защиты (*рисунком 1*).

В теории вычислительных систем принцип разделения функций (ответственности) SoC считается решающим фактором, обеспечивающим автономную модульность [5]. В соответствии с этим принципом программы реализуют функ-

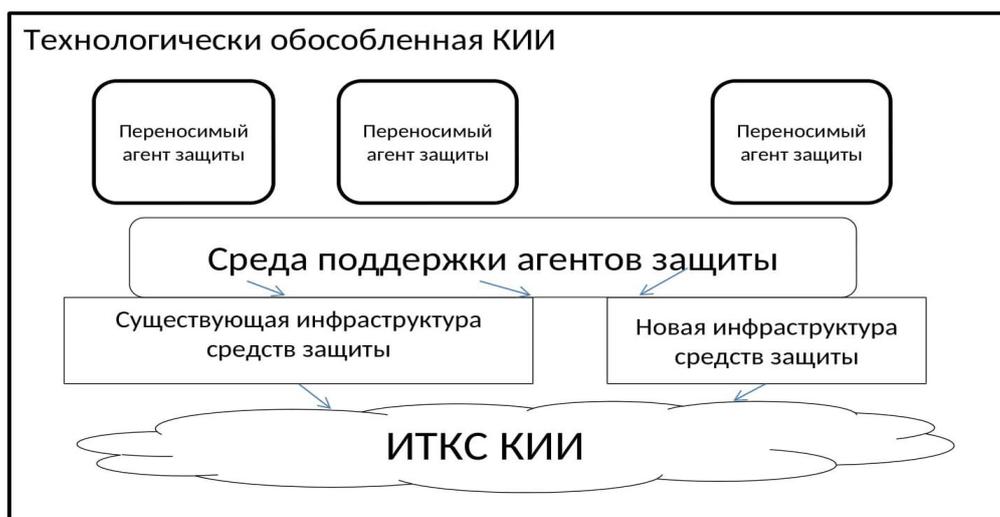
## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ции как полностью инкапсулированные модули с минимальным перекрытием. Примером такой функции является модуль, обеспечивающий антивирусную программу возможностью организации интерфейса со специфическими аппаратными и программными средствами поставщика обновлений базы сигнатур. В такой модуль инкапсулировано все программное обеспечение, необходимое для обмена данными с поставщиком обновлений.

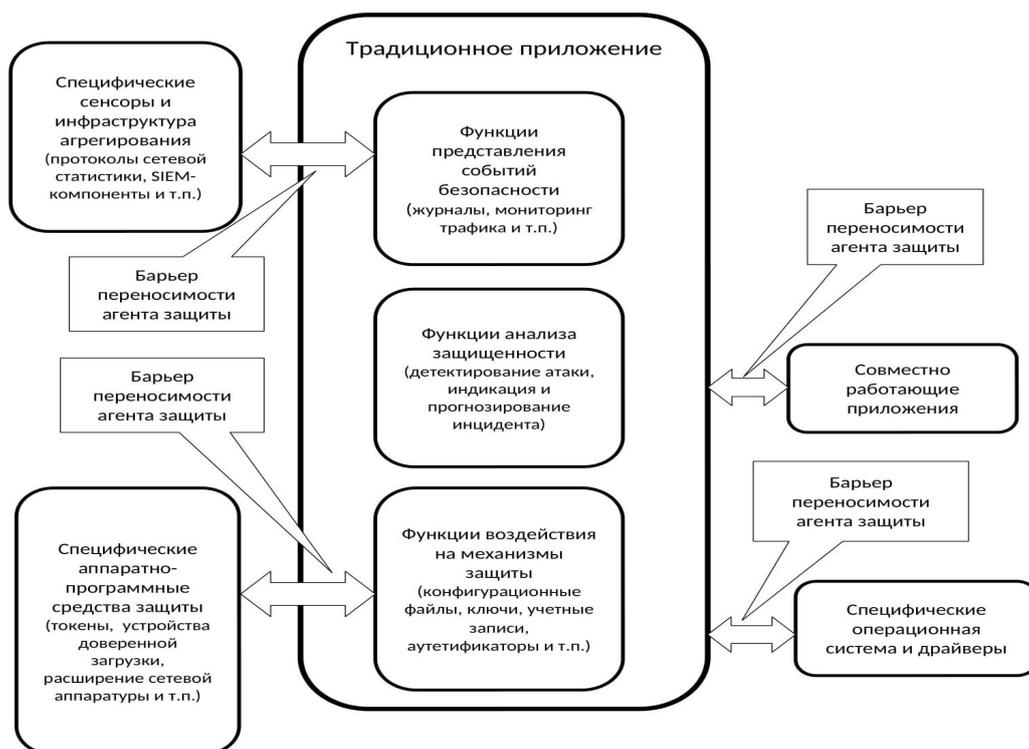
Взаимосвязь между средствами защиты конкретной вычислительной платформы и программами, осуществляющими обмен данными с

ними, представляет собой препятствие (барьер) для переносимости кода агентов защиты. Причина такого барьера состоит в том, что для каждого программно-технического решения безопасности специфицированы сообщения и протоколы обмена, и программа, обеспечивающей интерфейс с этими решениями, создается в соответствии с этими спецификациями. Поддержка таких сообщений и протоколов обязательна в любой взаимодействующей программе, в т.ч. и в агентах защиты.

Кроме того, для модификации ПО, обеспечивающего поддержку элементов отличающих-



**Рис. 1.** Среда поддержки агентов защиты



**Рис. 2.** Взаимосвязь традиционных приложений для агента защиты

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ся архитектур, требуется значительный объем ресурсов. В этом случае код, поддерживающий сообщения и протоколы действующей платформы, вероятно, требуется заменить новым кодом для взаимодействия с новой платформой. Принцип разделения функций SoC, позволяет уменьшить взаимосвязь до небольшого количества модулей, изолируя те функции, которые реализуют сообщения и протоколы, специфичные для конкретного средства защиты и снизить объем ресурсов, необходимых для организации поддержки новой платформы.

На *рисунке 2* показаны типичные источники (внутренние и внешние интерфейсы) взаимосвязи для агента защиты, выполненного в рамках парадигмы традиционного приложения, который включает три основные секции согласно принципу разделения функций SoC:

- группа функций воздействия на механизмы защиты (выполнение действий и взаимодействие);
- группа функций анализа защищенности (анализ и подготовка решения);
- группа функций представления событий безопасности (мониторинг и идентификация, обучение и развитие знаний).

Такой функциональный состав охватывает все ключевые назначения (функции высокого уровня) агента безопасности технологически обособленных КИИ и поддерживается архитектурой асимптотического управления безопасностью [1].

Функции представления событий безопасности взаимодействуют с сенсорами и/или коллектором событий безопасности [4], а также со средствами поддержки потоков событий безопасности для обучения и развития знаний. Эти функции включают в себя характеристики интерфейса между агентами защиты и компонентами конкретных платформ и поэтому тесно связаны со специфическими особенностями средств защиты. Поэтому изменения конкретного механизма защиты обязательно повлечет за собой изменения в программах агентов защиты.

Функции анализа защищенности включают в себя обработку данных на основании накопленных знаний и текущих результатов мониторинга. Эти функции могут «не знать», где исходные данные возникают или где будут использованы результаты анализа, они «знают» только, как данные следует обрабатывать. Эти функции связаны с политиками безопасности, и такая взаимосвязь желательна, поскольку политики определяют содержательные роли средств защиты в их целостности и, как правило, независимо от платформы.

Функциональность в части воздействия на механизмы защиты поддерживает интерфейсы «человек-компьютер» (воздействие в рамках организационных мер защиты), а также за интерфейсы «компьютер-компьютер» (автоматическая коррекция настроек и конфигураций программно-аппаратных средств защиты). Эти функции часто взаимосвязаны с аппаратными и программными интерфейсами, а также форматами дистанционного отображения информации. При изменении любых из этих специфичных объектов, часть функций воздействия на механизмы защиты также потребует изменения.

Кроме этого, есть еще, по крайней мере, два фактора зависимости:

- интерфейсы агента защиты взаимодействуют с другими совместно работающими или поддерживаемыми прикладными программами;
- программы компилируются для конкретной операционной системы, и часто не будут работать в другой операционной среде.

Существует две стратегии, «снижающие» барьеры для переносимости прикладных программ между платформами. Первая стратегия состоит в выборе стандартной спецификации интерфейсов платформы и принуждении двух взаимосвязанных сторон подчинению этому нормативу. Эта стратегия не может быть выбрана для среды поддержки агентов защиты, поскольку это привело бы к необходимости изменения кода большинства программ, используемых в составе сервисов безопасности обособленных КИИ.

Вторая, более предпочтительная, стратегия, предполагает вывод зависимых функций из состава агента защиты, и размещение их в вычислительной среде поддержки. С одной стороны, в эту среду потребуется добавить набор образцов сопрягающих компонентов, которые будут иметь дело с изменчивостью спецификаций интерфейсов различных платформ. С другой стороны, они будут предоставлять для среды поддержки стандартную спецификацию интерфейсов. Эти образцы сопрягающих компонентов изображены на *рисунке 3* и обозначены как уровень сопряжения.

Следует отметить, что предпочтительность второй стратегии не абсолютна и имеет естественные ограничения. Отличия платформ средств защиты могут оказаться столь велики, например, для разных индустрий, что потребуется предварительная типология этих платформ и применение соответствующей среды поддержки в рамках отдельных типов технологически обособленных КИИ.

Способность изменять триаду, состоящую из

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

средств защиты, соответствующей секции функций и компонента сопряжения, позволяет избежать необходимости «синхронизации» средств защиты и облегчает управление развитием системы безопасности без изменения агентов защиты.

### Сегменты архитектуры среды поддержки

Архитектура прикладных программ заранее определенного и конкретного применения («точечное» решение) включает в себя фрагменты кода (блоки, функции, подпрограммы), которые определяются по тому, что они делают. В то же время, архитектуры программного обеспечения для линейки программных продуктов имеют тенденцию определять две основные группы блоков кода: те, которые будут появляться в каждом варианте исполнения, и те, которые могут меняться для каждого варианта.

Реализации линейки среды поддержки имеют фиксированную структуру и компоненты, для которых предусмотрены варианты. При этом речь идет не столько об опциональности, как возможности отсутствия компонента, сколько о некотором разнообразии обязательно присутствующих компонентов. Это разнообразие является отражением различий платформ средств защиты и не снижает уровень переносимости приложений агентов защиты, поскольку для конкретных реализаций среды поддержки отличаются будут наборы программ, выполняющие функции уровня платформы. Таким образом, архитектура среды поддержки состоит из набора сегментов, в которых возможны варианты, и

построение этой архитектуры начинается с соединения таких сегментов.

Можно выделить следующие сегменты в составе архитектуры среды поддержки агентов защиты:

- сегмент операционной системы;
- сегмент сервисов ввода-вывода;
- сегмент сервисов платформы;
- сегмент транспортных сервисов;
- сегмент переносимых компонентов.

Сегмент операционной системы в иерархии ПО располагается глубже всех других сегментов и в нем реализованы интерфейсы операционной системы. Этот сегмент предоставляет вертикальный интерфейс к ПО во всех других сегментах.

Некоторые компоненты среды поддержки, возможно, требуют исполнения в операционной системе с разделением ресурсов времени и памяти, например, чтобы обеспечить разделение различных уровней безопасности или просто изолировать группы прикладных программ агентов защиты (например, тех, которые были разработаны различными организациями).

Развертывание решения среды поддержки в различных разделах (партициях памяти, виртуальных машинах) обеспечивает возможности разделения архитектурных сегментов на более мелкие программы и устанавливать в соответствующих разделах приложения агентов защиты. В каждом из разделов может существовать различное количество таких приложений

Программное обеспечение в сегменте сервисов ввода-вывода предоставляет мост для передачи данных от драйверов устройств операци-

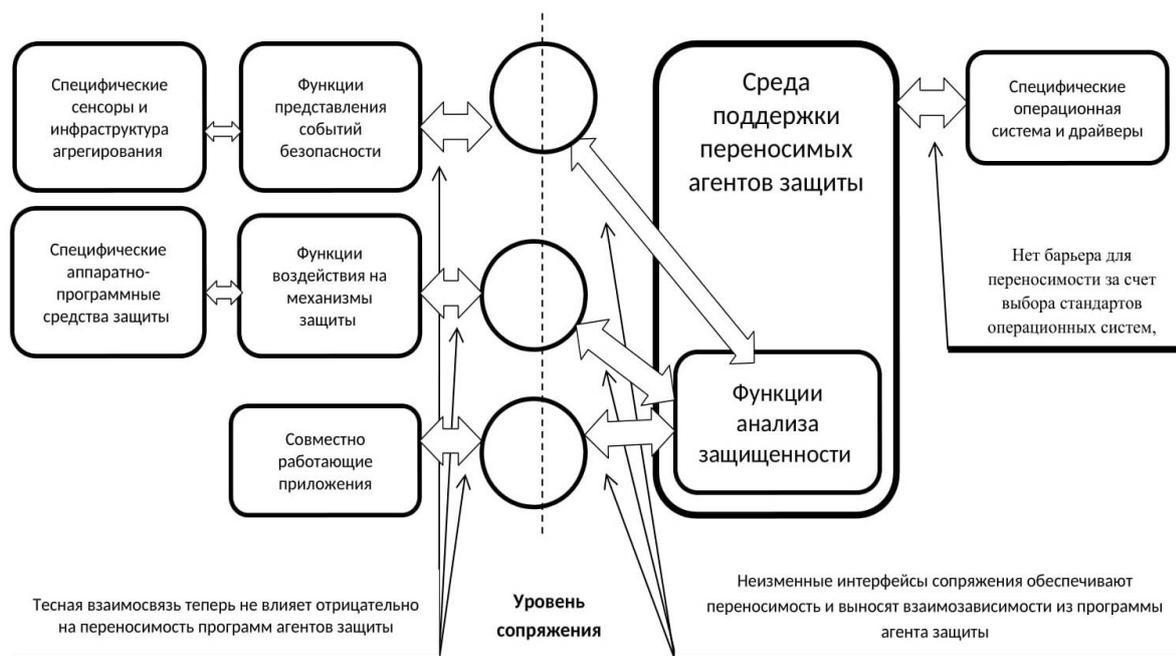


Рис. 3. Взаимосвязь приложений среды поддержки агентов защиты

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

онной системы в сегмент сервисов платформы, программные модули которого моделируют реальные устройства платформы средств защиты, такие как активное сетевое оборудование, различные платы управления доступом, аппаратура доверенной загрузки и т.п. Эти модули используют для связи с устройствами соответствующий интерфейс ввода-вывода. Такой интерфейс устройства обеспечивается драйвером для конкретной операционной системы, и сегмент ввода-вывода среды поддержки абстрагируют связь с таким драйвером.

Чтобы обеспечить и переносимость компонентов и их использование на разных платформах, среда поддержки включает сегмент сервисов ввода-вывода, программный код которого представляет собой набор шаблонов разработки адаптеров, каждый из которых осуществляет связь с драйвером устройства и затем преобразует данные в стандартизованный интерфейс среды поддержки. Если происходит замена устройства или драйвера, влияние таких изменений полностью инкапсулируется в одном адаптере, и не потребуются никаких других изменений, кроме замены адаптера в сегменте ввода-вывода. Непосредственное использование драйверов устройств привело бы к взаимосвязи с конкретной операционной системой и утрате переносимости, т.к. драйверы потенциально используют интерфейсы не предусматривающие среду поддержки агентов защиты.

Сегмент сервисов платформы включает в себя те части ПО, которые тесно взаимосвязаны со спецификациями функций и интерфейсов конкретной платформы. Другими словами, существование этого ПО обусловлено особенностями конкретного сервиса безопасности в составе платформы средств защиты. Размещение такого ПО в сегменте сервисов платформы облегчает создание переносимых приложений агентов защиты. Маршрут передачи данных между этими переносимыми приложениями и службами внутри сегмента сервисов платформы обеспечивается через сегмент транспортных сервисов. Эти службы сегмента сервисов платформы моделируют инкапсулируют логику и алгоритмы средств защиты, подключенных к среде поддержки. Кроме того, эти службы используются в качестве источников данных платформы. Сегмент транспортных сервисов перемещает данные между сегментом переносимых компонентов и сегментом сервисов платформы, также с ним соединяется сегмент операционной системы.

Хотя такая структурная схема соответствует архитектурной «модели брокера» [7], ее предназначение шире. Основная задача сегмента

транспортных сервисов – предоставить средства для перемещения данных таким образом, чтобы приложению агента не нужно было бы знать о том, где и как реализована конечная точка возникновения или применения данных. Такая абстракция источников и приемников данных требуется для обеспечения переносимости приложения агента.

В сегменте переносимых компонентов располагаются программные коды приложений агентов и общих сервисов, которые при совместном исполнении обеспечивают требуемую функциональность взаимодействия с компонентами платформы. Приложения агентов делаются переносимыми за счет выделения частей программы, которые тесно взаимосвязаны с функциональными особенностями платформы средств защиты, и расположения этих частей в секции общих служб сегмента переносимых компонентов (функции представления событий безопасности), а также в сегменте сервисов платформы (функции воздействия на средства защиты). Интерфейсы, которые соединяют сегмент переносимых компонентов с остальной частью архитектуры среды поддержки, обеспечиваются сегментом транспортных сервисов.

На *рисунке 4* представлен условный пример функций программного обеспечения, которые располагаются в каждом сегменте среды поддержки. В сегменте переносимых компонентов находятся два типа компонентов: общие прикладные сервисы и приложения агентов защиты. Все потоки данных, поступающие в сегмент и исходящие из сегмента переносимых компонентов, поддерживаются сегментом транспортных сервисов. Общие прикладные сервисы включают компоненты условно общие с точки зрения взаимодействия с приложениями агентов защиты. На *рисунке 4* это сервисы управления политиками и управления учетными записями. Сервисы, специфические в плане взаимодействия, такие как защита контента, поддержка криптоинфраструктуры или управление маршрутизацией, поддерживаются переносимыми приложениями агентов защиты.

Все данные, которые используются или создаются прикладными программами, включая данные, передаваемые из сегмента сервисов платформы, обрабатываются функцией маршрутизации в сегменте транспортных сервисов, а также передаются в механизмы транспортировки сторонних поставщиков. Среда поддержки допускает применение внешних транспортов, таких как DDS [8] или Web-сервисы, тогда между этими транспортом и функцией маршрутизации сегмента располагаются шаблоны разработ-

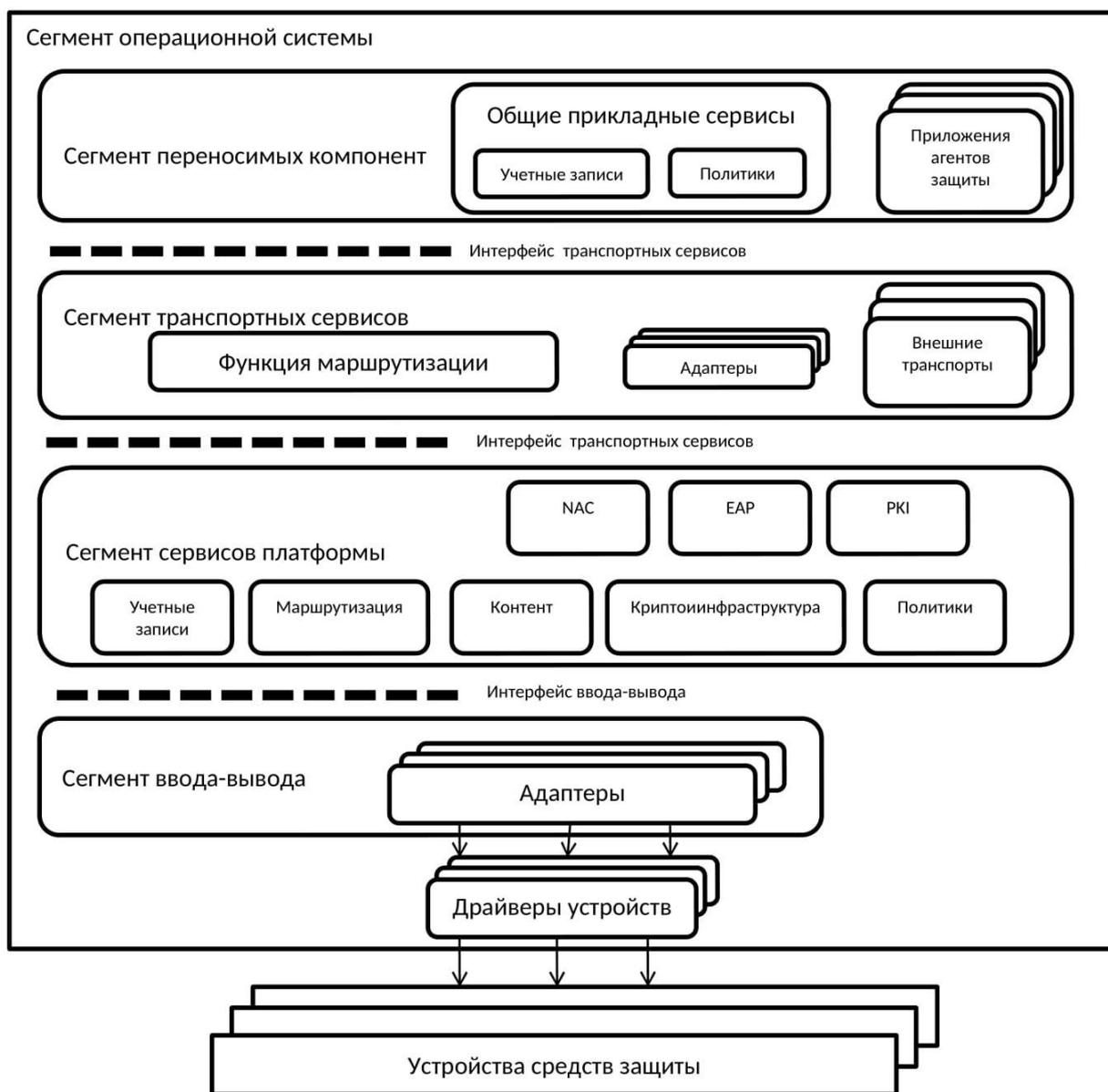
## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ки адаптеров, которые обеспечивают интерфейс передачи данных для функции маршрутизации и позволяют изменять транспорты, не вызывая модификацию для среды поддержки за пределами соответствующего адаптера.

Большинство компонентов в сегменте сервисов платформы моделируют конкретные средства защиты и инкапсулируют спецификации их интерфейсов. Примерами на приведенных рисунках являются управление учетными записями и авторизацией, управление маршрутизацией, защита контента, ядро аутентификации и управление криптоинфраструктурой, а также управление политиками безопасности. Эти специальные компоненты располагаются внутри сегмента сервисов платформы. Кроме того, име-

ются также общие сервисы платформы, такие как контроль исполнения сетевых политик NAC [9], EAP-оболочка аутентификации или инфраструктура открытых ключей PKI. Эти сервисы не имеют структурного выделения в сегменте переносимых компонент (как общие прикладные сервисы), поскольку предполагается, что они являются общими для достаточно широкого круга платформ и их влияние на переносимость агентов защиты незначительно.

Сегмент сервисов ввода-вывода содержит программные компоненты, которые абстрагируют ввод и вывод драйверов устройств в архитектуре среды поддержки. Подобно адаптерам между функцией маршрутизации сегмента транспортных сервисов и внешними транспор-



**Рис.4.** Сегменты архитектуры среды поддержки

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

тами, эти адаптеры позволяют создавать, модифицировать или заменять драйверы устройств таким образом, чтобы ограничить влияние изменений на любые решения в среде поддержки и не требует реализовывать какой-либо дополнительный интерфейс.

### Литература

1. Петухов А.Н., Пилюгин П.Л., Мартишин И.Д. Архитектура агента защиты технологически обособленных критических информационных инфраструктур на базе асимптотического управления безопасностью. Всероссийская конференция «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий (РЭУС-ИТ 2023)».
2. <https://cyberleninka.ru/article/n/arhitektura-bazovyh-agentov-mnogoagentnoy-sistemy-zaschity-informatsii-v-kompyuternyh-setyah/viewer>
3. Петухов А.Н., Пилюгин П.Л., Фадеев А.С. Агенты информационной безопасности технологически обособленных сетей критических информационных инфраструктур. Всероссийская конференция «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий (РЭУС-ИТ 2023)».
4. Ерохин С.Д., Петухов А.Н., Пилюгин П.Л. Управление безопасностью критических информационных инфраструктур. М. Горячая линия – Телеком, 2021. 240 с.
5. Dijkstra Edsger W. Selected Writings on Computing: A Personal Perspective, Springer-Verlag, 1982.
6. Erokhin Sergey, Petukhov Andrey, Pilyugin Pavel. «Adaptation processes in asymptotic safety management» IEEE Xplore 29 июня-1 июля 2022 года «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях» СИНХРОИНФО 2022.
7. Samtani G. Integration Brokers and Web Services // Web Services Business Strategies and Architectures / Samtani G., Sadhwani D. Apress, 2013. P.71-84.
8. <https://www.omg.org/news/whitepapers/DDS-Tactical-Edge-Whitepaper.pdf>
9. Pavel L. Pilyugin, Sergey D. Erokhin, Andrey N. Petukhov Sergey P. Litvinyuk. Global flows security policy for critical technologically isolated network infrastructures 2023 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO) IEEE Conference June 28-30, 2023.



# ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И РОБОТОТЕХНИКА



УДК 004.89

## СПОСОБ НЕПРЕРЫВНОЙ АДАПТИВНОЙ МНОГОФАКТОРНОЙ АУТЕНТИФИКАЦИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ СМАРТФОНА METHOD OF CONTINUOUS ADAPTIVE MULTIFACTOR SMARTPHONE USER AUTHENTICATION

### Алексей Игоревич Бугаков

старший специалист  
группы тестирования и отладки комплексов  
АНО «Институт инженерной физики»  
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,  
Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7(4967) 35-31-93  
E-mail: aibugakov@iifmail.ru

### Игорь Александрович Бугаков

заслуженный изобретатель РФ  
почетный работник науки и техники РФ  
доктор технических наук, профессор  
член Научного совета при Президиуме РАН  
по методологии искусственного интеллекта и  
когнитивных исследований  
вице-президент  
АНО «Институт инженерной физики»  
по инновационным проектам  
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,  
Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7 (4967) 35-31-93  
E-mail: iabugakov@iifmail.ru

### Алексей Николаевич Царьков

заслуженный деятель науки РФ  
доктор технических наук, профессор  
Президент АНО «Институт инженерной физики»  
Адрес: 142210 Московская обл., г. Серпухов,  
Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7 (4967) 35-31-93  
E-mail: antcarkov@iifmail.ru

### Михаил Михайлович Шульга

аспирант  
АНО «Институт инженерной физики»  
Адрес: 142210 Московская обл., г. Серпухов,  
Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7 (4967) 35-31-93

#### Аннотация

Описывается способ аутентификации пользователя смартфона, минимизирующий вероятность его несанкционированного применения, на основе адаптивного использования связанных с пользователем признаков, отражающих его биометрию, знание конфиденциальной информации, владение уникальными предметами и их образами. Адаптивность обеспечивается учетом условий применения смартфона (внешней среды, технических возможностей выполняемых функций, оставшегося заряда батареи), заданием одного из двух уровней допуска к функциям смартфона, исходя из значения текущей вероятности нахождения смартфона у санкционированного пользователя. Применению смартфона предшествует его привязка к санкционированному пользователю посредством обучения, которая, как и применение, реализуется с использованием технологий искусственного интеллекта.

**Ключевые слова:** смартфон, пользователь, аутентификация, допуск, первичный идентификатор, признак, обучение, адаптация, искусственный интеллект, условия применения. вероятность, порог, датчик, радиоканал, дообучение, оповещение.

#### Summary

A method for authenticating a smartphone user is described, minimizing the likelihood of its unauthorized use, based on the adaptive use of features associated with the user, reflecting his biometrics, knowledge of confidential information, possession of unique objects and their images. Adaptability is ensured by taking into account the conditions of use of the smartphone (external environment, technical capabilities of the functions performed, remaining battery charge), setting one of two levels of access to the functions of the smartphone, based on the value of the current probability of the smartphone being found by an authorized user. The use of a smartphone is preceded by its binding to an authorized user through training, which, like the application, is implemented using artificial intelligence technologies.

**Keywords:** smartphone, user, authentication, admission, primary identifier, sign, training, adaptation, artificial intelligence, application conditions. probability, threshold, sensor, radio channel, additional training, notification.

В наше время наличие у человека смартфона (от англ. smartphone – умный телефон) становится необходимостью, позволяющей не только общаться практически на любом рас-

стоянии с другими людьми, но и иметь доступ к различным удаленным источникам информации, совершать на расстоянии управляющие действия<sup>1</sup>. По сути, смартфон (СМ) становится

## ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И РОБОТОТЕХНИКА

продолжением человека, усиливая и расширяя его интеллектуальные и физические возможности. Вероятнее всего, следующим этапом будет виртуальное сращивание человека (его мозга) и СМ за счет неинвазивных методов их объединения на основе регистрации и усиления сигналов мозга человека, соответствующих тем или иным его мысленным командам, желаниям, чувствам, состояниям организма<sup>2</sup>. Физическое же сращивание посредством внедрения в мозг имплантов, оправданное сегодня в отдельных медицинских случаях, в обозримом будущем вряд ли станет массовым<sup>3</sup>.

Но все это дело возможного будущего. Современный СМ – это по-прежнему внешнее по отношению к телу человека устройство, управление которым требует от человека физических действий. Однако без этого устройства, повторим, большинство людей уже не представляют свое существование, все более ощущая СМ своим продолжением.

Очевидно, что такое продолжение должно быть индивидуальным, когда СМ настраивается на потребности, возможности и уровень развития конкретного человека. Такая индивидуализация СМ, учитывая быстрое развитие технологий искусственного интеллекта (ИИ), несомненно, будет ускоренно развиваться в ближайшем десятилетии [1,2].

Углубляющаяся индивидуализация СМ как продолжения конкретного человека для хранения общей и конфиденциальной информации, доступа к внешним ресурсам и объектам с возможностью управлять ими (например, совершать финансовые операции, управлять техническими объектами) делает все более значимым решение задачи минимизации вероятности несанкционированного доступа к СМ вследствие его потери или хищения.

В настоящее время проблема исключения возможности несанкционированного доступа к СМ и его функциям решается посредством введения пароля (например, в виде пин-кода, рисунка) или распознавания какого-либо биометрического параметра пользователя<sup>4</sup>. Однако как пароль,

так и отдельные биометрические признаки могут быть скомпрометированы в результате их кражи или подбора [3]<sup>5</sup>. Злоумышленник может использовать некоторые биометрические признаки санкционированного пользователя (СП), например, отпечаток пальца, воспользовавшись его бессознательным состоянием или введя его в это состояние. К тому же популярная биометрия имеет ряд ограничений, например: успешность использования отпечатка пальца зависит от его чистоты и степени сухости для любого из способов снятия (оптический, емкостной, ультразвуковой), а также от чистоты экрана сенсора; использование рисунка радужной оболочки глаза технически сложно реализуемо; распознавание лица требует использования трехмерного варианта, поскольку плоский вариант легко подделывается с помощью фотографии.

Но основной недостаток традиционного подхода к аутентификации СП СМ заключается в том, что этот процесс осуществляется только при разблокировке СМ с использованием первичного идентификатора. После успешного прохождения первичной аутентификации пользователю становится доступно большинство реализуемых СМ функций, он получает доступ к хранимой в нем информации, например, к телефонным номерам (с возможностью совершать звонки), к заметкам в календаре, фотографиям, переписке в мессенджерах. Если после этого СМ будет утерян или похищен (украден или отобран), то несанкционированный пользователь получит доступ к этой информации и отдельным функциям (например, может совершить звонок на платный номер). Конечно, доступ к наиболее опасным функциям, в частности, связанным с проведением финансовых операций, использованием персональных данных для получения или отправки официальных документов в современных СМ, как правило, закрыт обязательным дополнительным процессом аутентификации (обычно – двухфакторным, с использованием обратной связи). По желанию пользователя возможна самостоятельная постановка дополнительной защиты (например, парольной) и

<sup>1</sup> По состоянию на конец 2022 года смартфонами владели 4,3 млрд человек, т.е. более половины жителей Земли, из которых почти 4 млрд выходят в Интернет посредством смартфона (<https://habr.com/ru/news/767522/>). В России за 2023 год продано 30,7 млн смартфонов, что на 26% больше результата 2022 года (<https://www.gazeta.ru/tech/news/2023/12/29/22034059.shtml>).

<sup>2</sup> На сегодня этот путь уже реализован (например, мысленное управление парализованным человеком движением инвалидной коляски), но количество распознаваемых команд пока весьма ограничено.

<sup>3</sup> Учитывая проблему внедрения в мозг электродов и соединения живой и искусственной ткани, а также потенциальные риски (в том числе – морально-нравственные) такого соединения.

<sup>4</sup> Наиболее распространенные варианты: отпечаток пальца, изображение лица и радужной оболочки глаза, голос, рисунок вен, геометрия ладони [4].

<sup>5</sup> Технологии ИИ сегодня позволяют подделать голос, имея варианты аудиозаписи. Известны случаи кражи отпечатка пальца посредством его снятия со стакана, которым пользовался владелец СМ в баре (<https://rb.ru/news/bar-hackers/>).

на другие функции (приложения). Однако такая дополнительная аутентификация не только требует времени для ее настройки (по причине чего часто откладывается на «потом», которое, к сожалению, может наступить слишком поздно) и последующего прохождения, но и (и это главное) не решает проблемы несанкционированного доступа злоумышленника к СМ после ее прохождения СП (в частности, в случае отъема разблокированного СМ)<sup>6</sup>. Кроме того, в известных реализациях биометрической аутентификации (см., например, [4]) не учитываются условия применения СМ.

Отметим, что дополнительная аутентификация при входе в наиболее критические приложения как механизм защиты, кроме вышеупомянутого неудобства и потери времени, может нести и дополнительный риск компрометации. Вероятнее всего, пользователь, чтобы не запутаться, будет использовать на всех сервисах (приложениях) один и тот же идентификационный признак, например, один и тот же ПИН-код. Иначе ему придется хранить их список и информацию о том, какой код к чему относится, в памяти, что сложно и маловероятно для большинства пользователей, или на отдельном носителе (например, в записной книжке – бумажной или СМ), что более вероятно, но и более опасно (растет вероятность компрометации) и неудобно (трата времени на нахождение и введение).

Применение в настоящее время в качестве защитной меры интервала времени, по истечении которого неиспользуемый СМ блокируется, так что для разблокировки снова нужно проходить первичную аутентификацию, полностью не решает проблемы несанкционированного доступа. Вряд ли целесообразно задавать совсем малый интервал времени неиспользования, требуемый для уменьшения до приемлемого уровня риска использования СМ посторонним лицом, например, одну минуту или даже менее (при большом времени опасность несанкционированного использования при потере СМ, его краже или отъеме существенно возрастает), поскольку это крайне неудобно. Не обеспечивают требуемый высокий уровень защиты от несанкционированного использования и «умные замки», учитывающие статистику посещения пользователем тех или иных мест и отключающих временную блокировку при нахождении пользователя СМ в безопасном месте (например, дома).

Из вышеизложенного следует, что единственным способом защиты СМ от несанкционированного доступа является применение непрерывной аутентификации – аутентификации, осуществляемой не только в начале, но в течение всего времени использования СМ. Конечно, понятие «непрерывная аутентификация» в техническом плане весьма условно, ибо любая «непрерывность» в техническом исполнении всегда дискретна, так как реализуется посредством периодического (циклического) проведения аутентификации. Но поскольку это осуществляется при такой малой длительности периода (цикла), что совершение каких-либо значимых действий со СМ в течение этого периода невозможно (например, каждые несколько секунд), то в потребительском смысле можно говорить о непрерывности аутентификации. Такая аутентификация, с одной стороны, должна быть эффективной (должна снижать до безопасного значения вероятность использования СМ несанкционированным пользователем), а с другой стороны, быть максимально скрытной и не требовать от пользователя совершения неудобных действий, не отвлекать его от использования СМ по целевому назначению. Вряд ли целесообразно, например, каждые 15-20 секунд заставлять пользователя вводить ПИН-код или отпечаток пальца, произносить кодовое слово, рисовать что-то или расписываться на экране и др. Также желательно, чтобы реализация такой непрерывной аутентификации не требовала бы существенной конструктивной доработки СМ, т.е. базировалась бы на типовом наборе датчиков, которые есть в современных СМ, существенно не увеличивала бы энергопотребление СМ и не повышала требования к его вычислительным ресурсам. Кроме того, при реализации такой непрерывной скрытной аутентификации целесообразно максимально уменьшить обращение к внешним (по отношению к СМ и пользователю) базам данных для проверки (сравнения) идентификационных признаков пользователя<sup>7</sup> и, при необходимости<sup>8</sup>, отказаться от использования тех признаков пользователя СМ, которые уже хранятся в тех или иных внешних базах данных и могут быть скомпрометированы. Целесообразно использовать признаки, формируемые в процессе взаимодействия пользователя со СМ и не отправляемые для сравнения и подтверждения во внешние базы данных.

<sup>6</sup> Тенденция к введению двух или даже трехфакторной аутентификации при разблокировке того или иного критического приложения по-прежнему решает только проблему допуска, но не дальнейшего использования.

<sup>7</sup> Следует учитывать, что обращение к внешним базам данных может быть преднамеренно или непреднамеренно заблокировано (вследствие целенаправленной атаки на канал связи или сбоя в его работе).

<sup>8</sup> Например, в случае использования конфиденциальной информации или проведения специальных мероприятий.

# ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И РОБОТОТЕХНИКА

Основываясь на вышеизложенном, авторами предложен способ непрерывной адаптивной многофакторной аутентификации пользователя

СМ [5], который реализуется следующим образом (рисунк 1).

До начала использования СМ по своему на-

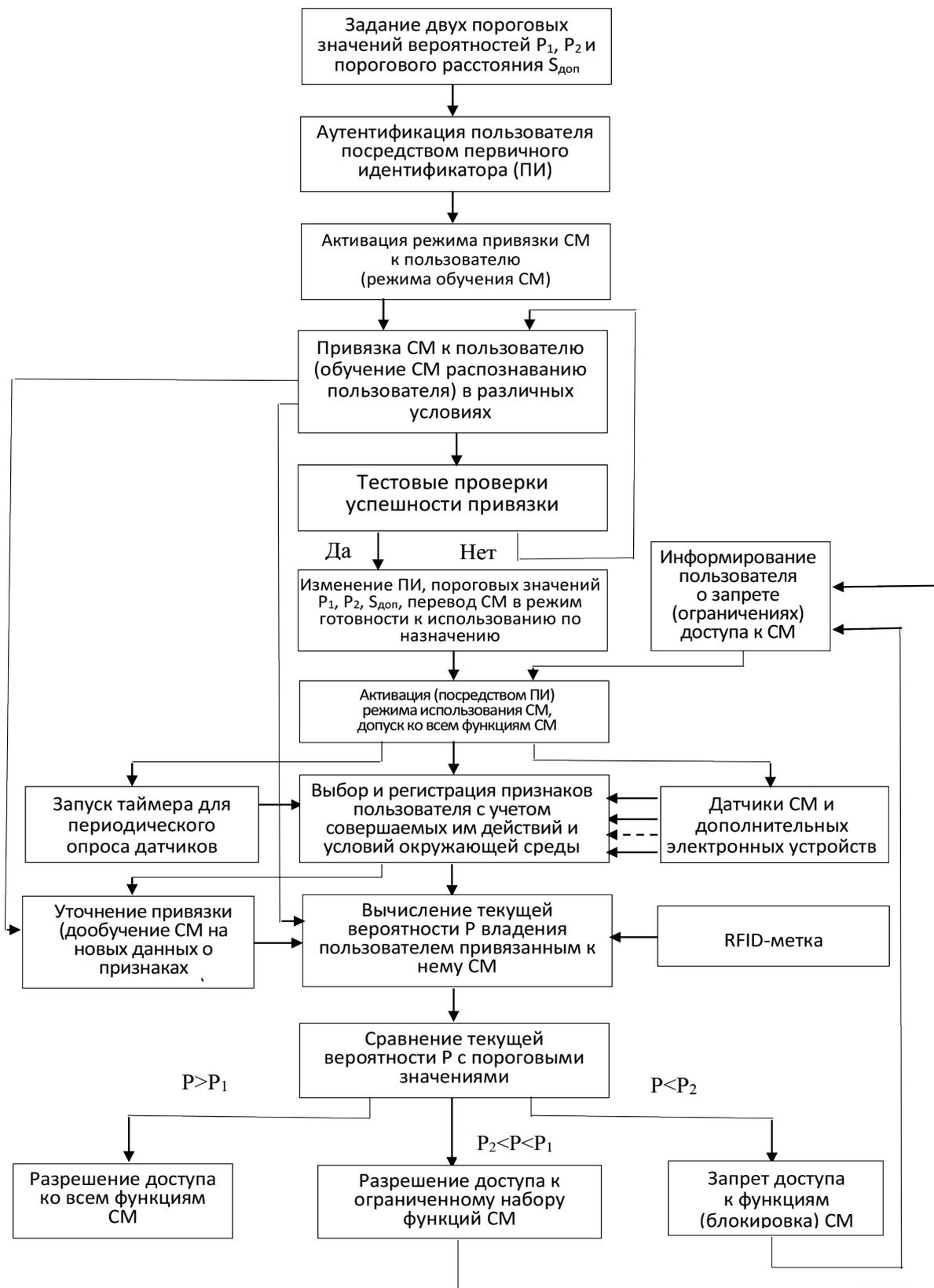


Рис. 1. Схема реализации способа непрерывной адаптивной многофакторной аутентификации пользователя смартфона

значению в условиях, исключающих доступ к СМ несанкционированных пользователей, задают два пороговых значения вероятности нахождения СМ в физическом владении СП –  $P_1$  и  $P_2$  (причем  $P_1 > P_2$ ) и пороговое значение расстояния  $S_{доп.}$  между СМ и СП, превышение которого означает, что СМ больше не находится в физическом владении СП, после чего проводят аутентификацию пользователя посредством первичного идентификатора (ПИ), в качестве которого используется то, что было передано пользователю в виде предмета или знания вместе с СМ при его получении (приобретении), например, пароль, ПИН-код, графический рисунок, аппаратный токен. В случае успешности аутентификации считают пользователя санкционированным, допускают его ко всем функциям СМ и активируют режим привязки СМ (режим обучения СМ) к нему.

Далее в условиях, по-прежнему исключающих доступ к СМ несанкционированных пользователей и максимально соответствующих различным реальным условиям применения СМ по своему назначению (условия внешней среды: освещенность, осадки, температура, вибрации, шум (ветер, люди, животные, машины), электромагнитные помехи), осуществляют эту привязку, обучая СМ распознаванию СП по присущим ему (связанным с ним) признакам, для чего периодически регистрируют эти признаки посредством датчиков СМ и датчиков дополнительных электронных устройств (ДЭУ), находящихся при пользователе (на руке, на теле, на шее, в одежде, в карманах одежды, в аксессуарах) и соединенных с СМ по радиоканалу, и далее, используя репрезентативные обучающие и тестовые выборки, посредством технологий искусственного интеллекта (в частности, с применением искусственных нейронных сетей глубокого обучения или с применением более совершенной, но и требующей больших вычислительных и энергетических ресурсов, технологии, объединяющей возможности современного глубокого обучения применительно к искусственным нейронным сетям и возможности подхода, основанного на символическом описании, правилах и байесовском выводе), реализованных непосредственно на СМ или на находящихся при пользователе и связанных с СМ (по радиоканалу) отдельных ДЭУ, осуществляют обработку зарегистрированных признаков, обобщая и запоминая их.

Привязка осуществляется по каждому признаку пользователя, в качестве которых могут использоваться:

- статические и динамические биометрические признаки СП: тембр и спектр голоса, фото

и видеоизображения лица или его частей (уха, носа, губ), отпечаток пальца, рисунок радужной оболочки или (и) сетчатки глаза, рисунок сосудов лица (его частей) или сосудов руки (ладони), геометрия кисти руки, параметры пульса (частота, ритмичность, напряжение), размеры (форма) и динамика сердца, электрическая активность сердца (параметры электрокардиограммы), параметры электроэнцефалограммы или ее части, издаваемый пользователем запах, химический состав выдыхаемого пользователем воздуха, динамика движения тела при ходьбе (походка), динамика движения руки с СМ, динамика подписи, динамика набора букв на виртуальной клавиатуре СМ, микровибрация пальцев;

- признаки уникальных образов, создаваемых пользователем, в которых присутствуют биометрические признаки пользователя и (или) знание им конфиденциальной информации (в частности, жесты, позы, последовательность действий, кодовые слова или фразы, мотивы мелодий);

- признаки уникальных образов находящихся при пользователе предметов, в частности, фотография какого-либо предмета, находящегося при пользователе (например, его наручных часов), сделанная камерой СМ с определенного расстояния и ракурса. Поскольку об этом (объект, расстояние, ракурс) знает только пользователь, то получение такой фотографии камерой СМ в процессе его дальнейшего использования в реальных условиях применения означает нахождение СМ во владении СП. Также могут использоваться признаки обонятельных образов (например, специфического, не ощущаемого человеком, запаха какого-либо находящегося при пользователе предмета) и звуковых образов (например, инфра- или ультразвуковых, не различимых человеком, низкоинтенсивных сигналов, периодически издаваемых находящимися при пользователе ДЭУ).

Количество примеров в обучающей выборке по каждому признаку задают с учетом вариативности параметров регистрируемого признака и возможного наличия помех различного вида в условиях дальнейшего реального применения СМ по своему назначению. Например, при распознавании лица пользователя с помощью камеры СМ обучающая выборка должна содержать примеры, полученные с разных ракурсов, а при распознавании голоса с помощью микрофона СМ учитывают наличие шумовых помех: голосов других находящихся рядом людей, шума от техники или ветра и пр.

Пользователь в процессе привязки СМ изменяет СМ по своему назначению и совершает

все разрешенные и необходимые для регистрации связанных с ним признаков действия.

После этого проверяют успешность привязки СМ по каждому признаку посредством проведения тестовой проверки с определением вероятности нахождения СМ в физическом владении СП, завершая процесс привязки по тому или иному признаку, если по результатам тестовой проверки определенное на основе обработки зарегистрированной информации об этом признаке значение вероятности нахождения СМ в физическом владении СП превышает первое (большее) заданное пороговое значение вероятности, и повторяют процесс привязки по признаку с проведением новой тестовой проверки, если по результатам текущей тестовой проверки определенное на основе обработки информации об этом признаке значение вероятности нахождения СМ в физическом владении СП оказывается меньше, чем первое (большее) задаваемое пороговое значение вероятности. Причем максимальное количество повторов обучения распознаванию отдельного признака в процессе привязки СМ к СП, при неуспешном проведении которых (определенное в каждой тестовой проверке после каждого повтора обучения значение вероятности распознавания этого признака оказалось менее первого (большого) заданного порогового значения вероятности) исключают этот признак из признаков, связанных с СП, задают, исходя из общего количества регистрируемых признаков (зависит от возможностей датчиков СМ и ДЭУ, находящихся при пользователе) и их информативности.

При этом для различных условий внешней среды и действий пользователя в процессе обучения СМ находят и запоминают наиболее предпочтительный признак (набор признаков) пользователя, посредством которого СП в цикле распознавания распознается с вероятностью, не менее первого (большого) порогового значения, требуемого для допуска ко всем функциям СМ, что позволяет в дальнейшем в реальных условиях применения СМ по своему назначению выбор регистрируемого признака (набора признаков) осуществлять адаптивно и автоматически.

После успешного обучения СМ распознаванию СП по выбранным для распознавания признакам изменяют первичный идентификатор, переводят СМ в режим готовности к использованию по назначению и после успешного прохождения СП аутентификации посредством измененного первичного идентификатора активируют режим использования СМ с допуском СП ко всем функциям СМ.

В процессе применения пользователем СМ

по своему назначению осуществляют непрерывную аутентификацию пользователя, для чего посредством датчиков СМ и датчиков находящихся при пользователе ДЭУ периодически регистрируют признаки пользователя, на которых проходило обучение СМ, на основе обработки информации о которых определяют значение текущей вероятности нахождения СМ в физическом владении СП. После чего сравнивают полученное значение текущей вероятности нахождения СМ в физическом владении СП с двумя заданными пороговыми значениями вероятности и, в зависимости от результата сравнения, принимают одно из трех решений: во-первых, решение о том, что СМ находится в физическом владении СП с сохранением допуска пользователя ко всем функциям СМ, если полученное значение текущей вероятности больше первого (большого) заданного порогового значения вероятности; во-вторых, решение о том, что СМ больше не находится в физическом владении СП с блокировкой СМ и информированием пользователя о необходимости для получения доступа ко всем функциям СМ повторно пройти аутентификацию посредством первичного идентификатора, если полученное значение текущей вероятности меньше второго (меньшего) заданного порогового значения вероятности; в-третьих, решение о том, что СМ находится в физическом владении СП, но с вероятностью, недостаточной для допуска ко всем функциям СМ, на основании чего запрещают пользователю, информируя его об этом, доступ к наиболее важным (ответственным, критическим) функциям (приложениям, сервисам) СМ, если полученное значение текущей вероятности меньше первого (большого) заданного порогового значения вероятности, но больше второго (меньшего) заданного порогового значения вероятности. Запрет может вводиться как сразу после получения результата сравнения текущей вероятности с пороговыми значениями, так и спустя некоторое время, достаточное для завершения СП начатого действия с СМ. Для восстановления доступа ко всем функциям СМ пользователю необходимо вновь пройти активацию СМ с использованием первичного идентификатора, после чего вновь начинается периодический сбор сенсорной информации о признаках пользователя, циклическое вычисление текущей вероятности нахождения СМ в физическом владении СП и ее сравнение с пороговыми значениями, на основании чего пользователю разрешается или запрещается (ограничивается) доступ к функциям СМ.

В любой момент времени посредством успешного прохождения пользователем аутентифика-

ции посредством первичного идентификатора восстанавливают доступ пользователя к закрытым (в связи с недостаточным значением текущей вероятности) функциям (приложениям, сервисам) СМ.

Важной особенностью заявляемого способа является то, что в процессе использования СМ по своему назначению в реальных условиях применения при проведении непрерывной аутентификации пользователя на основе регистрации связанных с пользователем признаков осуществляют дообучение СМ распознаванию СП на основе новых данных о признаках, на которых проходило первичное обучение СМ, на основе чего уточняют признаки СП, учитывая как временное (имиджевое, в связи с болезнью и др.), так и временное (вследствие изменения привычек, поведенческих автоматизмов, старения) изменение связанных с пользователем признаков, а также учитывая новые, не учитываемые ранее (при первичном обучении СМ) принадлежащие СП признаки. На основании дообучения пополняют «опыт» СМ, тем самым повышая качество привязки СМ к СП.

В процессе использования СМ по своему назначению в реальных условиях применения посредством находящейся при пользователе RFID-метки, связанной по радиоканалу с СМ, периодически определяют текущее расстояние между RFID-меткой и пользователем (период задают равным длительности цикла распознавания пользователя), при превышении которым заданного порогового расстояния, означающим, что СМ потеряно (забыто, украдено), включают сигнал оповещения (световой, звуковой, вибросигнал) пользователя и, если пользователь не является владельцем СМ, сигнал оповещения владельцу, выдавшему СМ пользователю, блокируют доступ к функциям СМ, а также запрещают его выключение. Запрет на выключение позволяет целенаправленно вести поиск потерянного или похищенного СМ, причем для облегчения поиска величину (амплитуду) формируемого посредством находящейся при пользователе RFID-метки сигнала оповещения задают в виде функции текущего расстояния между СМ и RFID-меткой (в частности, обратно пропорциональной этому расстоянию, так что с приближением к СМ величина сигнала увеличивается), что облегчает (упрощает) процедуру поиска потерянного (забытого, украденного) СМ.

В случае, когда в процессе применения СМ по своему назначению собираемых данных о признаках пользователя в течение цикла распознавания недостаточно для вычисления вероятности нахождения СМ в физическом владе-

нии СП, временно блокируют доступ к функциям СМ и посредством специального светового и (или) звукового сигнала информируют пользователя о необходимости в течение определенного времени пройти аутентификацию посредством действующего первичного идентификатора или совершения одного или нескольких специальных, отработанных для такого случая в процессе обучения СМ, действий, обладающих в текущих условиях использования СМ требуемой информативностью аутентификации. Например, дать СМ возможность сфотографировать лицо пользователя с определенного ракурса и определенной мимикой, принять конкретную позу, ответить на вопрос, предполагающий знание конфиденциальной информации, посредством набора текста или, если позволяют условия, голосом (в последнем случае осуществляется дополнительная аутентификация по голосу).

При появлении угрозы доступа к функциям СМ несанкционированного пользователя (в частности, отобравшего СМ у СП посредством применения силы или угрозы применения силы и находящегося в непосредственной близости от СП, так что датчиками СМ и ДЭУ пользователь распознается как санкционированный), предусматривают возможность экстренной блокировки СМ посредством совершения пользователем регистрируемого (датчиками СМ или находящегося при пользователе ДЭУ) заранее определенного и при привязке СМ отработанного действия (например, произнесения регистрируемого микрофоном СМ кодового слова или фразы).

Выбор конкретного перечня используемых датчиков (СМ и соединенных с ним находящихся при пользователе ДЭУ) для регистрации признаков пользователя при привязке и использовании СМ по своему назначению в реальных условиях применения определяют, исходя из предназначения и технических возможностей СМ и ДЭУ, а также требуемого уровня защиты СМ от несанкционированного доступа. При этом также учитывают наличие доступной (не мешающей использованию СМ по своему назначению) вычислительной мощности, которую можно потратить на распознавание, а также величины оставшегося заряда батареи СМ и (или) батарей находящихся при пользователе ДЭУ, используемых для регистрации и обработки признаков пользователя (при малом оставшемся заряде из целесообразных для текущей ситуации признаков адаптивно и автоматически выбираются те признаки, регистрация и обработка информации о которых требует минимального расхода энергии).

При необходимости, между первым и вто-

## ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И РОБОТОТЕХНИКА

рым задаваемыми пороговыми значениями вероятности нахождения СМ в физическом владении СП задают несколько дополнительных пороговых значений вероятности, постепенно, по мере их уменьшения, все более ограничивающих доступ пользователя к функциям СМ, т.е. чем меньше значения текущей вероятности, тем к меньшему количеству функций СМ допускается пользователь.

Информация о признаках пользователя, полученная в процессе привязки (обучения) СМ и уточняемая в процессе дообучения СМ в реальных условиях применения, сохраняется только в СМ и (или) в находящихся при пользователе и используемых для его распознавания ДЭУ, не передается и не хранится во внешних устройствах.

Сигналы части датчиков, регистрирующих в качестве связанных с СП признаков параметры процессов, протекающих в теле пользователя (в частности, параметры электрокардиограммы, параметры пульса), используют не только для аутентификации пользователя, но и для распознавания его психофизиологического состояния с целью запрета доступа к функциям СМ (для исключения несанкционированного доступа к нему), но с сохранением возможности вызова помощи в случае выхода значений этих параметров за допустимые пределы, свидетельствующего о потере (возможности потери) пользователем контроля над владением СМ вследствие нахождения в обморочном (предобморочном) состоянии или в состоянии сильного стресса (например, в случае сердечного приступа, применения физического насилия или угрозы такого применения). При этом СП, в физическом владении которого находится СМ, разрешают неоднократно изменять первичный идентификатор.

### Литература

1. Бугаков А.И., Бугаков И.А., Царьков А.Н., Шульга М.М. Непрерывная аутентификация

пользователя смартфона / III Межведомственная научно-практическая конференция «Телекоммуникации и кибербезопасность: специальные системы и технологии». Сборник трудов. Под редакцией заслуженного деятеля науки РФ, почетного радиста РФ, доктора технических наук, профессора В.А. Цимбала и доктора технических наук, профессора О.И. Атакищева. Серпухов: МОУ «ИИФ», 2021. Т.2. С.71-78.

2. Смартфоны будущего: какими они будут? URL: <https://habr.com/ru/companies/first/articles/768814/>

3. Как и куда Андроид сохраняет ваши отпечатки пальцев и насколько это безопасно. Публикация от 25.01.2018. URL: <https://prostotech.com/mobilzone/6107-kak-i-kudaandroid-sohranyaet-vashi-otpechatki-palcev-i-naskolko-eto-bezopasno.html>.

4. Патенты: US 6549194 B1 «Способ безопасного ввода PIN-кода на сенсорном дисплее» (заявка US-41039799-A от 30.09.1999 г.); RU 2589397 C2 «Аутентификация графических жестов» (заявка № 2013152162/08 от 09.10.2011 г.); RU 2721361 «Способ и устройство для разблокировки отпечатком пальца» (заявка 2019104951 от 16.08.2018 г.); RU 2 638 775 C2 «Система контроля и управления доступом на базе биометрических технологий аутентификации личности по голосу и лицу» (заявка 201311904 от 18.03.2013 г.); RU 2 670 648 C1 «Интерактивный способ биометрической аутентификации пользователя» (заявка 2017144202 от 18.12.2017 г.); «RU 2 660 617 C1 «Устройство и способ установления или удаления защиты на контенте» (заявка 2017106247 от 28.07.2015 г.).

5. Бугаков А.И., Бугаков И.А., Царьков А.Н., Шульга М.М. Способ защиты электронного многофункционального устройства от несанкционированного доступа // Заявка на изобретение №2022126590/07 (058037) от 11.10.2022.



## СОБЫТИЯ

### ДА БУДЕТ НОВЫЙ КОМПЛЕКС!

Накануне Нового года состоялась церемония освящения и закладки капсулы в честь начала строительства Производственного комплекса по изготовлению готовых лекарственных форм АО «АЛУРОН»



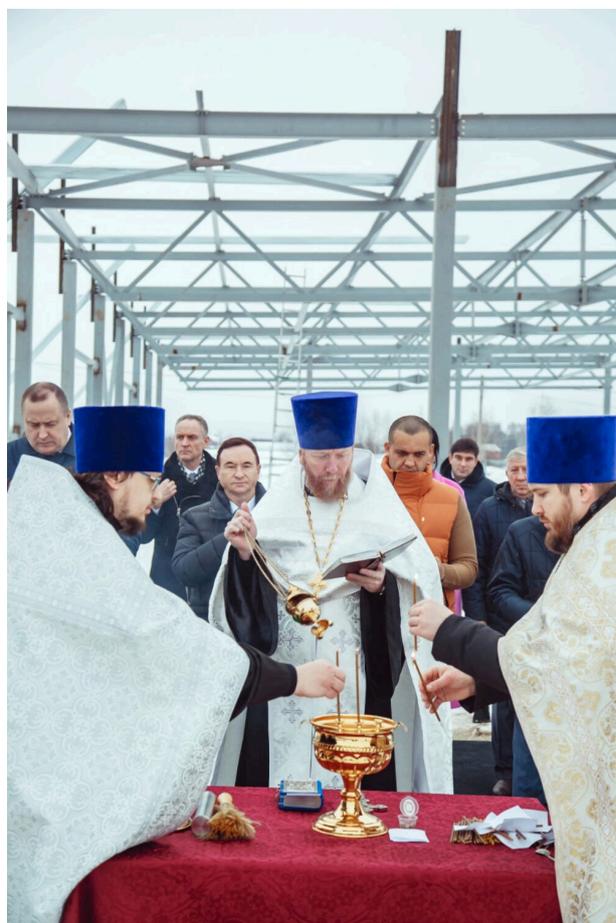
В церемонии приняли участие Президент АНО «Институт инженерной физики», заслуженный деятель науки Российской Федерации, доктор технических наук, профессор, почётный гражданин города Серпухов Алексей Николаевич Царьков, Глава городского округа Серпухов Сергей Николаевич Никитенко, Президент Международной ассоциации бокса (ИВА) Умар Назарович Кремлев и духовенство во главе с Благочинным Серпуховского округа Московской епархии иереем Дионисием (Коськиным).

Чин освящения будущего Производственного комплекса провёл Благочинный Серпуховского округа иерей Дионисий (Коськин). Священнослужители совершили молебен и провели обряд освящения фундамента будущего комплекса. В ближайшем будущем здесь будут трудиться сотрудники Института – ученые и инженеры, специалисты высшей категории с Божьей благодатью и по Святой Божьей воле. Планируется, что в новом комплексе будут производиться лекарственный препарат ТАМЕРОН®, лекарственный



препарат МИОДИСТРОФЕН, а также инновационный, первый отечественный нанопоровый севенатор НАНОПОРУС.

В этот же день состоялось торжественное открытие Комплекса автотранспортной техники и высокоточной механообработки. Ленточку, символизирующую начало эксплуатации комплекса, перерезали А.Н. Царьков, С.Н. Никитенко и У.Н. Кремлев. Алексей Николаевич напомнил, что была также заложена капсула и освящен фундамент будущего дома для автомобильной техники Института. Сегодня это современный комплекс для хранения и ремонта автомобильной техники, проведения высокоточных механических работ.



Умар Назарович отметил, что сегодня дан старт к созданию новых рабочих мест для жителей городского округа Серпухов.

В церемонии приняли участие сотрудники Института, представители администрации Серпухова, работники предприятий – резидентов Технопарка в сфере высоких технологий «Научно-технологический и фармацевтический производственный комплекс (ТехноИнноватика)».



**Alatortsev Alexey I.** Doctor of Technical Sciences. Head of the department. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarney l., 1a.

**Begaev Alexey N.** Candidate of Technical Sciences. CEO of JSC North-West Echelon. St. Petersburg, st. Embankment of the Smolenka River, 14.

**Belokon Dmitry A.** Postgraduate student of the Department of Information Security of Automated Systems. North Caucasus Federal University. Stavropol, Pushkina street, 1.

**Berkovich Sergei B.** Honorary Surveyor of the Russian Federation. Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Navigation and Geodetic Systems. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarney l., 1a.

**Boychenko Igor A.** Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, JSC «TsNIIMash», leading researcher. Korolev, Moscow region, Pionerskaya str., 4.

**Bugakov Alexey I.** Senior Specialist complex testing and debugging groups. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarney l., 1a.

**Bugakov Igor A.** Honoured devisor of Russia. Honorary Worker of Science and Technology of the Russian Federation. Doctor of Technical Sciences, professor. Vice-President of Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarney l., 1a.

**Butrina Elena P.** Head of the LISZI group, Interregional Educational Institution. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarney l., 1a.

**Erokhin Sergey D.** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. Rector. Moscow Technical University of Communications and Informatics. Moscow, Aviamotornaya 8a,

**Grinev Evgeny M.** Postgraduate student of the Department of Information Security of Automated Systems at the North Caucasus Federal University. Stavropol, Pushkin str., 1.

**Kazakov Rafael' R.** Candidate of Technical Sciences. Deputy Head of the Department of «Tactics of units and subdivisions of rocket and space defense». Military space Academy named after A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, ul. Zhdanovskaya, 13.

**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.

**Kolombet Vladimir V.** Consultant-programmer. Bank of Russia. Moscow, st. Neglinnaya, 12, k. V.

**Komarov Igor I.** Candidate of Physical and Mathematical Sciences. Associate Professor. Faculty of Information Technology Security, ITMO University. St. Petersburg, Kronverksky pr., 49, lit. A.

**Kotov Nikolai I.** Candidate of Technical Sciences, Professor. Deputy Head of the Department of Navigation and Geodetic Systems Development. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarney l., 1a.

**Krikunov Alexey A.** Candidate of Technical Sciences. Senior Lecturer at the Department of Operations and Systems Research. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya St., 17.

**Kurguzov Valery V.** Lecturer. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Kvashennikov Vladislav V.** Doctor of Technical Sciences. Leading Researcher. JSC «Kaluga Research Institute of Telemechanical Devices». Kaluga, ul. K. Marx, 4.

**Labaznikov Andrey P.** Candidate of Technical Sciences. Officer.

**Le Vang X.** Graduate student at the Faculty of Information Technology Security, ITMO University; Russian Federation. St. Petersburg, Kronverksky pr., 49, lit. A.

**Lesnykh Vadim N.** Junior scientist. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

**Makeev Maxim I.** Researcher. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Makhaev Alexander Y.** Head of the Department-Deputy Head of the Center of Navigation and Geodetic Systems. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarney l., 1a.

**Melnik Dmitriy Y.** Postgraduate of the Department of Missile Control System. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.



## AUTHORS

**Musatov Roman L.** Candidate of Technical Sciences Assistant to the President – Head of editorial and publishing department. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

**Nakonechny Andrey B.** Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

**Pashintsev Vladimir P.** Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation. Honorary Radio Operator of the Russian Federation. Doctor of Technical Sciences. Professor. Professor of at the Department of Information Security of Automated Systems. North Caucasus Federal University. Stavropol, Pushkina st., 1.

**Pavlov Alexandr A.** Doctor of Technical Sciences, Professor. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Force. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Pavlov Fedor A.** Researcher. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Petukhov Andrey N.** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. Head of Department, Moscow Technical University of Communications and Informatics. Moscow, Aviamotornaya, 8a.

**Pilyugin Pavel L.** Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Moscow Technical University of Communications and Informatics. Moscow, Aviamotornaya, 8a.

**Pushkareva Elena Y.** Doctor of Technical Sciences. Professor. Professor of the Department. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Romanenko Alexandr Y.** Candidate of Technical Sciences. Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

**Romanenko Yuriy A.** The honoured worker of a science of the Russian Federation. Doctor of Technical Sciences, Professor. Senior Researcher. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Ryzenko Sergey V.** Candidate of technical sciences. Head of department Information Security Center. Moscow reg., Korolev, Yubileiny microdistrict, st. Leninskaya, 11.

**Sholokhov Aleksei V.** Doctor of Technical Sciences. Professor. Head of the Department of Navigation and Geodetic Systems Development. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

**Shulga Mikhail M.** Postgraduate. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

**Smirnov Dmitriy V.** Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, associate professor. Full member of the Academy of Engineering Sciences. Professor of the Department FSBEI of HE MAI (NRU). First Vice President of the Institute – Deputy Chairman of the Board of the Institute of Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

**Smurov Sergey V.** Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, professor. First Vice President of the Institute – Chief Designer. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

**Tzar'kov Alexey N.** Honoured scientist of Russia, Doctor of Technical Sciences, professor. President of Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

**Volkov Gennadiy G.** Doctor of Physical and Mathematical Sciences. Professor. Senior Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

**Zakharov Vladimir L.** Doctor of Military Sciences, professor. Full member of the Academy of Military Sciences. Professor. FSBEI of HE MAI (NRU). Moscow, Volokolamsk Highway, 4.

**Zelenevsky Vladimir V.** Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Honorary Radio Operator of the Russian Federation. Doctor of Technical Sciences, Professor, professor of the department. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Force. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Zelenevsky Yury V.** Doctor of Technical Sciences, associate professor. Researcher. Military Academy of the Strategic Missile Force. Moscow Reg., Balashikha, Karbysheva st., 8.



## ЭТИКА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

Редакционный совет и редакционная коллегия научно-технического журнала «Известия Института инженерной физики» придерживаются принятых международным сообществом принципов публикационной этики, отраженных, в частности, в рекомендациях Комитета по этике научных публикаций (Committee on Publication Ethics).

Все статьи, предоставленные для публикации в журнале «Известия Института инженерной физики», проходят рецензирование на оригинальность, этичность и значимость. Соблюдение стандартов этического поведения важно для всех сторон, принимающих участие в публикации: авторов, редакторов журнала, рецензентов, издателя.

### ОБЯЗАННОСТИ РЕДАКТОРА

**Редактор в своей деятельности обязуется:**

- постоянно совершенствовать журнал;
- следовать принципу свободы мнений;
- стремиться к удовлетворению потребностей читателей и авторов журнала;
- исключать влияние интересов бизнеса или политики на принятие решений об опубликовании материалов;
- принимать решения на основании принципа справедливости и беспристрастности, обеспечивать прозрачность редакционной деятельности на всех ее этапах;
- не раскрывать информацию о предоставленных материалах никому, кроме соответствующих авторов, рецензентов, других редакционных консультантов;
- оценивать рукописи исключительно по их научному содержанию;
- принимать решение о публикации материалов, руководствуясь следующими главными критериями: соответствие рукописи тематике журнала; актуальность, новизна и научная значимость представленной статьи; ясность изложения; достоверность результатов и законченность выводов. Качество исследования и его актуальность являются основой для решения о публикации;
- принимать меры для обеспечения высокого качества публикуемых материалов и защиты конфиденциальности персональной информации. При обнаружении содержательных, грамматических, стилистических и иных ошибок редакция обязуется предпринимать все меры для их устранения;
- обосновать свое решение в случае принятия или отклонения статьи;
- предоставить автору рецензируемого материала возможность для обоснования своей исследовательской позиции;
- поощрять дискуссии и предоставлять возможность для изложения точки зрения оппонентов;
- не использовать в собственных исследованиях информацию из неопубликованных материалов.

### ОБЯЗАННОСТИ ЧЛЕНОВ РЕДСОВЕТА (РЕДКОЛЛЕГИИ)

**Решение о публикации.**

Редсовет (редколлегия) журнала «Известия Института инженерной физики» являются ответственными за принятие решения о том, какие статьи будут опубликованы в журнале. Решение принимается на основании представляемых на статью рецензий

Редсовет (редколлегия) придерживаются политики журнала и действуют в рамках законных требований, поскольку несут ответственность за нарушение авторских прав.

### Конфиденциальность.

Рецензенты или кто-либо из сотрудников редакции не должны разглашать никакую информацию о предоставленной рукописи кому-либо, кроме самого автора, рецензентов, потенциальных рецензентов, членов редакционного совета (коллегии) и издателя, поскольку она является конфиденциальной.

### Раскрытие информации и конфликт интересов.

Неопубликованные материалы, находящиеся в предоставленной статье, не должны быть использованы в собственном исследовании научного редактора и рецензентов без специального письменного разрешения автора.

### ОБЯЗАННОСТИ РЕЦЕНЗЕНТОВ

Рецензенты оказывают помощь членам редакционного совета (редколлегии) при принятии редакционного решения, а также помогают автору усовершенствовать работу.

### Конфиденциальность.

Любые рукописи, полученные для рецензирования, должны восприниматься как конфиденциальные документы. Они не могут быть показаны либо обговорены с другими лицами, кроме тех, которые уполномочены редакцией.

### Подтверждение источников.

Рецензенты должны идентифицировать опубликованную работу, которая не была процитирована автором. Любое утверждение, что наблюдение, происхождение либо аргумент ранее были сообщены, необходимо сопровождать соответствующей ссылкой. Рецензент должен также донести до сведения редакции о любой существенной схожести или частичном совпадении между рукописью, которая рецензируется, и другой уже опубликованной работой, которая ему знакома.

### Раскрытие информации и конфликт интересов.

Приватная информация или идеи, возникшие в процессе рецензирования, должны остаться конфиденциальными и не могут быть использованы в личных интересах. Рецензент не должен рассматривать рукопись, если имеет место конфликт интересов в результате его конкурентных, партнерских либо других отношений или связей с кем-либо из авторов, компаний или организаций, связанных с материалом публикации.

### ОБЯЗАННОСТИ АВТОРОВ

#### Оригинальность и плагиат.

Авторы должны гарантировать, что они написали полностью оригинальную работу. Если авторы использовали работу и/или слова других авторов, это должно быть соответственно указано и процитировано.

#### Доступ к данным и сохранность.

Автор должен быть готов обеспечить доступ к данным, связанными с материалом публикации, если таковой возможен. Во всяком случае, автор должен быть готов сохранять такие данные на протяжении разумного периода времени после опубликования.

#### Многоразовая, избыточная или конкурирующая публикация.

Автор не должен публиковать работы, которые описывают по сути одно и то же исследование, более чем один раз или более чем в одном журнале.

Предоставление рукописи более чем в один журнал одновременно означает неэтичное издательское поведение и является недопустимым.

#### Подтверждение источников.

Необходимо предоставлять должное подтверждение работ других авторов. Авторы должны процитировать публикации, которые имели значение при создании заявленной работы.

#### Авторство материала.

Авторство необходимо ограничить теми лицами, которые внесли ощутимый вклад в концепцию, проект, исполнение или интерпретацию заявленной работы. Всех, кто внес ощутимый вклад, следует внести в список соавторов.

Автор должен гарантировать, что список авторов содержит только действительных авторов и в него не внесены те, кто не имеет отношения к данной работе, а также то, что все соавторы ознакомились и одобрили окончательную версию статьи и дали согласие на ее публикацию.

#### Раскрытие информации и конфликт интересов.

Все авторы должны сообщать, если в их работе имеется финансовый либо другой конфликт интересов, который может повлиять на результаты или интерпретацию их рукописи.

#### Ошибки в опубликованных работах.

Если автор обнаружит существенную ошибку или неточность в своей опубликованной работе, его обязанность – незамедлительно сообщить об этом в редакцию журнала или издательство 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. 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.

**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.**
- **Современная медицина и фармацевтика.**
- **Наукометрия.**
- **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.



# AUTONOMOUS NON-PROFIT ORGANIZATION “INSTITUTE OF ENGINEERING PHYSICS”

## CONTENTS

### INSTRUMENT MAKING, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES AND SYSTEMS

**Zakharov V.L., Smirnov D.V., Kazakov R.R.**

Features of constructing block diagrams of spectral-zonal optical-electronic means ..... 2

**Berkovich S.B., Kotov N.I., Makhaev A.Y., Sholokhov A.V.**

Control of the stability of reference directions during metrological support of azimuth measuring instruments ..... 6

**Kolombet V.A., Lesnykh V.N., Kolombet V.V.**

Representation of the structure of natural intelligence in biophysical psychoanalysis ..... 13

### RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATION

**Kvashennikov V.V.**

Neural signal processing modules in channels with grouped errors ..... 18

**Pashintsev V.P., Belokon D.A., Grinev E.M., Boychenko I.A.**

Scope of applicability of the approximate formula for the permissible signal-to-interference ratio when calculating the reliability of short-wave communications with Rician fading ..... 25

**Ryzhenko S.V.**

Analysis of existing approaches to the question of protection of information processed by computer technology from leakage through technical channels .. 31

**Zelenevsky V.V., Zelenevsky Y.V., Kurguzov V.V., Nakonechny A.B.**

Method of estimating noise immunity of decimeter data transmission system with spaced reception of radio signals ..... 35

**Alatortsev A.I., Krikunov A.A.**

Assessing the intensity of subscriber traffic in telecommunication systems built on the basis of broadcast radio networks ..... 40

### INFORMATION SCIENCE, COMPUTING AND MANAGEMENT

**Tsarkov A.N., Pavlov A.A., Pashintsev V.P., Romanenko Y.A., Romanenko A.Y., Makeev M.I., Pavlov F.A.**

Justification of the method of reservation of specialized computers ..... 45

**Butrina E.P.**

Assessment of the influence of EM wave refraction in the troposphere and the path topography on the attenuation of EM waves and the probability of detecting a protected object ..... 53

**Le V.X., Begaev A.N., Komarov I.I.**

Information security threat model for product quality tracking systems for emerging markets ..... 61

**Smurov S.V., Volkov G.G.**

Spin-parton path to the proton quantization ..... 71

**Pushkareva E.Y., Melnik D.Y.**

Mathematical models of ballistic missile stabilization systems and analysis of their stability when controlling current and final parameters ..... 80

**Erokhin S.D., Labaznikov A.P., Petukhov A.N., Pilyugin P.L., Musatov R.L.**

Environment for supporting autonomous agents for protecting technologically isolated critical information infrastructures ..... 86

### ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND ROBOTICS

**Bugakov A.I., Bugakov I.A., Tsarkov A.N., Shulga M.M.**

Method of continuous adaptive multifactor smartphone user authentication .. 94

**EVENTS** ..... 102

**AUTHORS** ..... 103

**THE ETHICS OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS** ..... 105

**REQUIREMENTS TO AUTHORS** ..... 106

Учредитель и издатель – АНО «Институт инженерной физики».

Адрес: 142210,

Московская обл., г.о. Серпухов, г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а, стр. 1.

Подписной индекс: 59190  
по каталогу «Урал-Пресс»

Адрес редакции: 142210, Московская обл.,  
г.о. Серпухов, г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а, стр. 1.

Тел: +7 (4967) 35-31-93, 35-13-71

Факс: +7 (4967) 35-44-20 <http://www.iifrf.ru>

E-mail: [info@iifmail.ru](mailto:info@iifmail.ru)

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ №ФС 77-84007 от 30.09.2022  
Отпечатано на полиграфической базе АНО «Институт инженерной физики».

Адрес: 142210, Московская обл., г.о. Серпухов, г. Серпухов,

Большой Ударный пер., д. 1а, стр. 1.

Подписано в печать 24.01.2024.

Дата выхода в свет 1.02.2024. Тираж 2000 экз. Цена свободная.

© Автономная некоммерческая организация  
«Институт инженерной физики», 2024.



Автономная некоммерческая организация  
“Институт инженерной физики”