

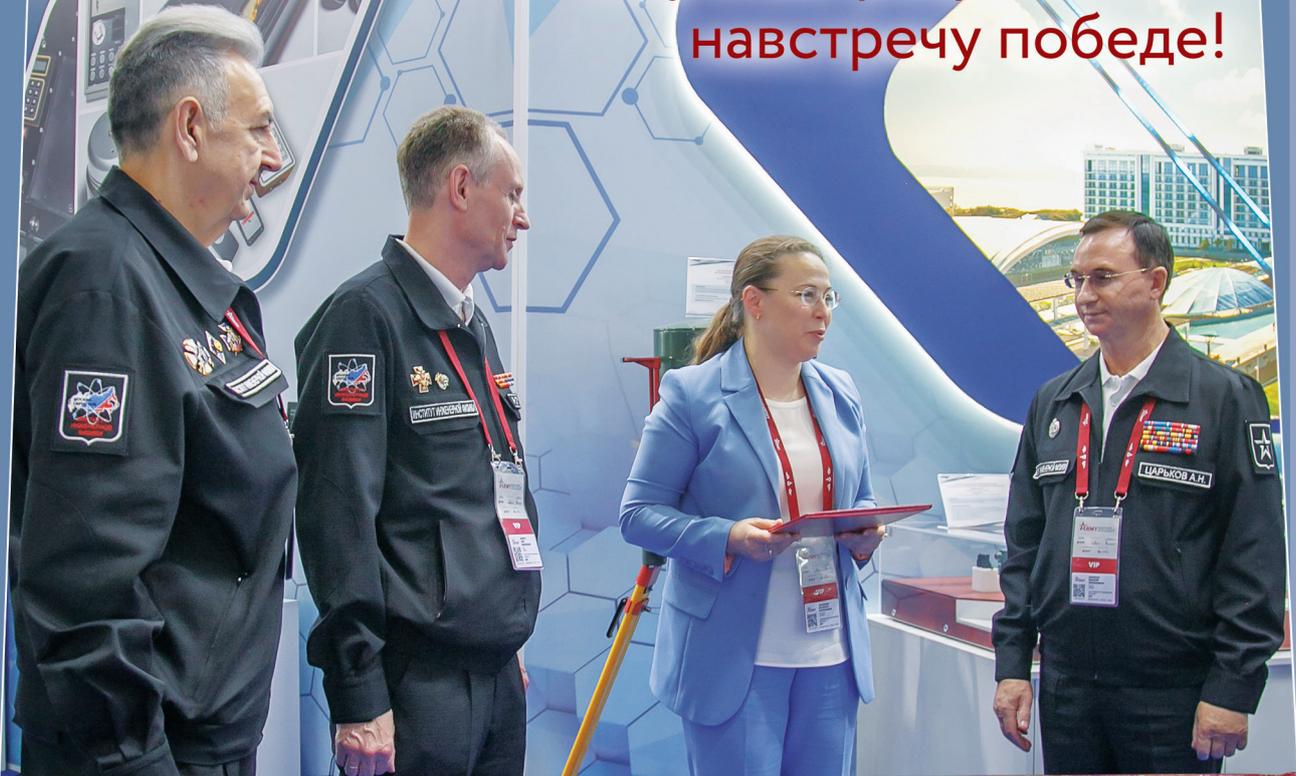
№4<sup>+0</sup>  
2022 [66]

# ИЗВЕСТИЯ

научно-технический журнал  
ИНСТИТУТА ИНЖЕНЕРНОЙ ФИЗИКИ



Научные разработки -  
навстречу победе!



МИНИСТЕРСТВО ИНВЕСТИЦИЙ, ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
И НАУКИ МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ

## РАСПОРЯЖЕНИЕ

11.08.2022 № 41

г. Красногорск

О присвоении статуса технопарка в сфере высоких технологий  
«Научно-технологический и фармацевтический производственный комплекс»  
(ТехноИнноватика), статуса управляющей компании технопарка в сфере высоких  
технологий Автономной некоммерческой организации «Институт инженерной  
физики»



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

**2** Захаров В.Л., Смирнов Д.В., Сергеев В.А.

Методика обеспечения соответствия параметров бортовых оптико-электронных средств заданным требованиям

**6** Коробков А.А., Кулик М.В., Садекова А.А.

Методика параметрического расчета витых теплообменников, предназначенных для получения сжиженного метана, используемого в качестве горючего в ракетно-космической технике

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

Мониторинг периода мультивибратора как способ изучения универсальной системы утраивающихся периодов

**20** Смуров С.В., Салько А.Е., Загарских В.И., Кузин Е.Н.

Малоимпульсное иницилирующее устройство предохранительного типа для бортовой автоматики ракетно-космической техники

### РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

**24** Зеленевский В.В., Зеленевский Ю.В., Егоров В.В., Наконечный А.Б., Попов А.В.

Методика оценки помехоустойчивости радиоканала с кодовым уплотнением данных и расширением спектра при воздействии импульсной прерывистой помехи

**29** Квашенников В.В.

Линейные стохастические помехоустойчивые коды в стирающем канале связи

### ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

**35** Смуров С.В.

Метод генерации перестановки бит с использованием массива управляющих переменных

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

О влиянии углового движения отделяющихся частей перспективных средств выведения на отклонение возможных точек падения в заданный район

**45** Пушкарёв Ю.А., Пушкарёва Е.Ю., Пискулин И.В.

Управление робототехническим комплексом по углу курса на основе метода разности скоростей

**52** Лычагов А.С., Дружинин И.М., Карпов К.В.

Перекрестки автомобильных дорог как источник информации для коррекции системы навигации подвижного объекта

**57** Скрыль С.В., Мазин А.В., Сычёв А.М., Бороненков А.И., Никулин С.С.

Функциональное моделирование как инструмент формализации процесса перехвата переизлученных высокочастотных сигналов, модулированных информативными акустическими сигналами

**62** Смуров С.В., Волков Г.Г., Столбов С.Н.

Нарушение неравенств Белла в квантовой физике низких и высоких энергий

**72** Смирнов Д.В., Атакищев О.И., Лысачев М.Н., Атакищев Э.И., Атакищев К.Э., Мовчан В.О.

Особенности применения метаграмматик для моделирования сложноструктурированных процессов функционирования автоматизированных систем управления технологическими процессами атомных электростанций

**78** Бутрина Е.П., Олейников В.П.

Защищённость объекта: событийная модель угроз

**83** Юшин В.В., Мамонтов А.Н., Макарова Л.В., Турбал Р.А., Медведев В.О.

Метод идентификации слабых сейсмических источников на региональных расстояниях на примере станции международной системы мониторинга NVAR

**87** Вершинин Е.В., Бураков И.И.

Способы определения возгораний на изображениях

### ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И РОБОТОТЕХНИКА

**92** Бугаков И.А., Елистратов В.В., Царьков А.Н.

О признаках и уровнях искусственного интеллекта. Часть 1. Концептуальные основания

### 102 НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ • НАУЧНЫЕ РЕЦЕНЗИИ • ОТЗЫВЫ

**102** Михайлов Ю.Ф., Назаренко А.В.

Обзор направлений интеллектуализации электронных образовательных ресурсов на основе создания адаптивных алгоритмов

### 107 AUTHORS

### 109 ЭТИКА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

### 110 ТРЕБОВАНИЯ К АВТОРАМ СТАТЕЙ

### Научно-технический журнал

### ИЗВЕСТИЯ Института инженерной физики №4 (66) 2022

Издаётся с апреля 2006 г. Выходит ежеквартально

ISSN 2073-8110

Включен в «Перечень ВАК»

по научным специальностям:

2.2.11. Информационно-измерительные  
и управляющие системы

2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

2.3.1. Системный анализ, управление  
и обработка информации

2.3.6. Методы и системы защиты информации,  
информационная безопасность

Главный редактор,  
председатель редакционного совета  
и редакционной коллегии

### Алексей Николаевич Царьков

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

### Редакционный совет

### Геннадий Иванович Азаров

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

### Сергей Владимирович Дворянкин

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

### Николай Михайлович Емелин

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

### Валерий Иванович Николаев

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

### Владимир Георгиевич Редько

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

### Юрий Александрович Романенко

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

### Анатолий Васильевич Тодосийчук

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

### Игорь Анатольевич Шеремет

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

#### Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

**Владимир Владимирович 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

#### Евгений Михайлович Ананьев



Генеральный директор –  
Первый Вице-президент  
АНО «Институт инженерной физики»  
почетный работник науки и техники РФ  
кандидат технических наук, доцент

#### Уважаемые коллеги и партнеры! Дорогие друзья!

Существует добрая традиция – в канун Нового года и Рождества Христова оглядываться назад и подводить итоги года уходящего. Каким он был 2022 год? Какие события оставили наиболее заметный след в истории нашего Института, который в году наступающем будет отмечать 30-летие со дня основания?

В 2022 году Институт инженерной физики продолжил уверенно считаться одним из ведущих инновационных научных центров Подмосквья, постоянно повышающим качественный уровень проведения фундаментально-поисковых работ, НИОКР; внедряющим новые технологии и достижения прикладных наук в проекты развития производства, вооружения и военной техники. В первую очередь это касается уникальных и востребованных в оборонной промышленности и гражданской сфере на государственном уровне разработок в области АСУ и связи, навигации и геодезического обеспечения, физико-энергетических систем, защиты информации, медицины, квантовых информационных технологий.

Важно особо подчеркнуть, что целый ряд инновационных разработок Института не имеет мировых аналогов и высоко оценены на федеральном уровне.

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

Важной вехой в развитии АНО «Институт инженерной физики» стало решение Министерства инвестиций, промышленности и науки Московской области о присвоении Институту статуса Технопарка в сфере высоких технологий «Научно-технологический и фармацевтический производственный комплекс» (ТехноИнноватика), которое было вручено делегации Института в рамках проведения Международного военно-технического форума «Армия-2022».

Серьезным достижением наших ученых в области фармацевтических технологий можно считать решение Минздрава РФ об изменении срока годности с 2-х до 3-х лет лекарственного препарата **TAMEPHON®**, который в уходящем году поступил в свободную розничную продажу на одной из ведущих электронных фармацевтических площадок страны.

Институт постоянно расширяет свои научные, производственные и технологические площадки, и летом состоялась Церемония освящения и закладки капсулы в честь начала строительства Комплекса автотранспортной техники и высокоточной механообработки.

Что касается духовной жизни, на базе Института открыто региональное отделение Императорского Православного Палестинского Общества (ИППО). Председателем серпуховского регионального отделения ИППО избран Президент Института А.Н. Царьков.

От всей души поздравляю коллектив АНО «Институт инженерной физики», всех наших коллег и партнеров с наступающим Новым годом и Рождеством Христовым! Желаю всем крепкого здоровья, благополучия, удачи, а нашему Институту дальнейших успехов и процветания!

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.384.3

## МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ СООТВЕТСТВИЯ ПАРАМЕТРОВ БОРТОВЫХ ОПТИКО- ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ЗАДАНЫМ ТРЕБОВАНИЯМ

## METHODOLOGY FOR ENSURING THE COMPLIANCE OF THE PARAMETERS OF THE ONBOARD OPTOELECTRONIC MEANS WITH THE GIVEN REQUIREMENTS

**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

**Виктор Александрович Сергеев**

кандидат технических наук, доцент  
доцент кафедры «Бортовых  
информационных и оптико-электронных  
средств космических аппаратов»  
ВКА им. А.Ф. Можайского  
Адрес: 197198, Санкт-Петербург,  
ул. Ждановская, д. 13  
Тел.: +7 (904) 514-10-15  
E-mail: sergeev\_vka@mail.ru

### Аннотация

Рассмотрены соотношения для расчета основных параметров бортовых оптико-электронных средств, а также факторы и условия эксплуатации, оказывающие влияние на ограничения значений рассчитываемых параметров. Сформулированы направления совершенствования оптико-электронных средств при применении предлагаемой методики расчета с целью их соответствия предъявляемым требованиям.

**Ключевые слова:** космический аппарат, оптико-электронное средство, ориентация, точность, оптическая система, приемник оптического излучения.

### Summary

Relationships for calculating the main parameters of onboard optoelectronic means, as well as factors and operating conditions that affect the limitations of the values of the calculated parameters are considered. Directions for improving optical-electronic means when applying the proposed calculation method in order to meet the requirements are formulated.

**Keywords:** spacecraft, optoelectronic means, orientation, accuracy, optical system, optical radiation receiver.

В любом оптико-электронном средстве (ОЭС) можно выделить две составные части: оптическую систему (ОС) и приемник оптического излучения (ПОИ). Оптическая система строит изображение наблюдаемой области пространства в плоскости приемника излучения. Приемник оптического излучения преобразует пространственно-распределенную энергию оптического излучения изображения в распределенный по времени электрический сигнал, амплитуда которого пропорциональна величине падающего светового потока. В состав ПОИ могут также входить устройства первичной обработки сигнала.

Важнейшие параметры ОЭС можно определить на основе анализа энергетических соотношений между сигналами, поступающими на вход прибора, и порогом чувствительности ОЭС – величиной минимального потока или освещенности на входе прибора, эквивалентной уровню шумов и помех, приведенных к этому входу. Построение математической модели ОЭС начинается с описания условий его применения и последовательных этапов преобразования сигнала в ОС и ПОИ. В большинстве современных ОЭС в качестве ПОИ используются многоэлементные приборы с ПЗС- или КМОП-структурой (матрицы

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

и линейки). Выбор основных параметров ОЭС определяется требованиями к качеству получаемой с их помощью информации. В свою очередь эти требования обусловлены условиями применения ОЭС, такими как рабочий спектральный диапазон, требуемая чувствительность, дальность действия, параметры рабочей среды и шумов, характеристики объекта исследования и другими.

### Расчет параметров оптической системы

Структура оптической системы может быть различной. Ее выбор зависит от решаемых прибором задач и режимов его работы. Приведенными ниже соотношениями описывается взаимосвязь параметров ОЭС. Размер поля зрения прибора является, как правило, заданным значением. Он зависит, в первую очередь, от функционального назначения прибора. ОЭС измерительного типа должны обладать максимально возможной точностью, поэтому размер поля зрения у них ограничен и обычно не превышает 20°. Для приборов наблюдения этого явно недостаточно [1]. Для выбранных ПОИ и фокусного расстояния размер поля зрения определяется по формуле

$$2\omega = \arctg \frac{f'}{2d}, \quad (1)$$

где  $2\omega$  – угол поля зрения ОЭС;

$f'$  – заднее фокусное расстояние ОС;

$d$  – линейный размер ПОИ по соответствующей координате.

Величина заднего фокусного расстояния определяет минимальный габаритный размер ОЭС по продольной оси (без учета длины бленды). Для заданного фокусного расстояния ОС угол поля зрения ОЭС будет определяться только форматом ПОИ. Отсюда можно сделать вывод, что требуемый формат объектива должен быть не меньше, чем формат  $M \times M$  пикселей выбранной матрицы. Размер поля зрения по диагонали квадратного кадра будет равен

$$2\omega \approx \frac{\sqrt{2} \cdot M \cdot d}{f'}, \left( \text{по стороне } \frac{M \cdot d}{f'} \right).$$

Телесный угол в стерадианах (1 стерадиан  $\approx 3282,8^\circ$ ) участка небесной сферы, проецирующегося на приемник излучения, составляет

$$\Omega \approx \left( \frac{M \cdot d}{f'} \right)^2.$$

Эти соотношения точны для малых углов полей зрения. При использовании широкоугольных объективов необходимо учитывать искажения, возникающие при проецировании небесной сферы на плоский матричный приемник излучения.

Способность ОС пропускать световой поток

характеризует относительное отверстие

$$F = \frac{D_{\text{вх}}}{f'}, \quad (2)$$

где  $D_{\text{вх}}$  – диаметр входного зрачка ОС.

Яркость  $B$  удаленного протяженного источника и создаваемая этим источником освещенность  $E$  изображения, занимающего несколько растровых элементов на матрице, связаны соотношением

$$E = \frac{\pi B \tau_{\text{ос}}}{4F^2}, \quad (3)$$

где  $\tau_{\text{ос}}$  – коэффициент пропускания оптической системы.

Общее ослабление света объективом связано с квадратом его апертуры  $F$  и коэффициентом пропускания  $\tau_{\text{ос}}$ . Таким образом, апертура определяет энергию светового потока, попадающего в ОЭС [2].

Для удаленного точечного источника освещенность входного зрачка ОЭС определяется по формуле

$$E = \frac{I}{R^2}, \quad (4)$$

где  $I$  – сила излучения источника в направлении наблюдателя;

$R$  – расстояние до источника излучения.

Световой поток от наблюдаемого объекта, попадающий на вход ОЭС, определяется по формуле

$$\Phi = E \cdot S_{\text{вх}} = \frac{\pi D_{\text{вх}}^2}{4} \cdot \frac{I}{R^2}, \quad (5)$$

где  $S_{\text{вх}}$  – площадь входного зрачка.

Световой поток, формирующий выходной сигнал, выразится следующим образом

$$\Phi' = \Phi \cdot \tau_{\text{ос}} = \frac{\pi D_{\text{вх}}^2 I \tau_{\text{ос}}}{4R^2}. \quad (6)$$

Разрешающая способность ОС оценивается либо по формуле (1), либо дифракционным разрешением, т.е. диаметром диска Эри. Если изображение точечного источника, получаемое оптической системой, ограничено только дифракцией, то оно представляет собой яркое пятно, окруженное системой светлых и темных полос. В центральном пятне, называемом диском Эри, сосредоточено примерно 84% энергии падающего света, остальные 16% приходятся на кольца. Диаметр диска Эри, определяемый как диаметр первого темного кольца, равен

$$\delta_{\text{кр}} = 2,44 \frac{\lambda \cdot f'}{D_{\text{вх}}} = 2,44 \cdot \lambda \cdot F \quad (7)$$

где  $\lambda$  – длина волны оптического излучения.

Из формулы (7) становится очевидным, что максимальный диаметр диска Эри соответствует длинноволновой области спектра. Поэтому для оценки разрешающей способности необходимо взять «красную» границу рабочего спектрального диапазона ПОИ.

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

## Расчет параметров ПОИ

Теперь рассмотрим процессы, протекающие в матричном ПОИ. Число носителей заряда  $N_e$ , накопленных в зарядовом пакете матрицы и соответствующих изображению элемента протяженного источника, определяется как

$$N_e = N \cdot \Delta^2 \cdot T_H \cdot E \cdot S(\lambda), \quad (8)$$

где  $N$  – число фотонов, потенциально доступных ПОИ в рабочем спектральном диапазоне (0,4 ÷ 1,06) мкм в 1 сек на 1 см<sup>2</sup> при равномерной освещенности 1 лк;

$\Delta^2$  – площадь элемента матричной структуры;

$T_H$  – время накопления сигнала в ПОИ;

$E$  – освещенность, формирующая зарядовый пакет при заданном времени накопления;

$S(\lambda)$  – относительная спектральная чувствительность ПОИ.

Произведение освещенности на время накопления ( $T_H \cdot E$ ) принято называть экспозицией. Формула (8) показывает линейную зависимость между экспозицией и сигналом, накопленным в ПОИ. Это дает принципиальную возможность регулировки чувствительности ПОИ. При этом важно учитывать то, что от времени накопления зависит не только чувствительность ОЭС, но и степень влияния темнового тока ПОИ.

Приведенные выше соотношения справедливы для изображения протяженного источника, превышающего площадь элемента ПЗС. При построении изображения точечного источника число носителей  $N_e$ , накопленное в зарядовом пакете, определяется как

$$N_e = N \cdot \Phi' \cdot T_H \cdot S(\lambda) \quad (9)$$

Для конкретной модели матричного ПОИ значения  $S(\lambda)$ ,  $N_{\max}$  и  $\Delta^2$  являются паспортными параметрами.

Другим важным параметром, определяющим качество измерений сигналов в ОЭС, является отношение «сигнал/шум». Вероятность обнаружения сигнала при наиболее жестких условиях применения ОЭС определяется пороговым отношением «сигнал/шум»

$$\mu_{\text{пор}} = 20 \lg \frac{E_{\text{пор}}}{E_{\text{шум}}}, \quad (10)$$

где  $E_{\text{пор}}$  – пороговая освещенность матрицы, при которой задача обнаружения сигнала в поле зрения решается с заданной вероятностью;

$E_{\text{шум}}$  – значение среднеквадратичной оценки случайной составляющей освещенности фонового шума, усредненной по всему кадру.

С использованием формулы (8) можно найти пороговую освещенность ПОИ, необходимую для достоверного обнаружения сигнала от объекта для заданных условий наблюдения

$$E_{\text{пор}} = \frac{N_{\text{пор}}}{N \Delta^2 T_H S(\lambda)}. \quad (11)$$

Из формулы (3) для заданных условий применения ОЭС определяется минимальное значение относительного отверстия ОС

$$F = \sqrt{\frac{\pi B_{\min} \tau_{\text{ос}}}{4 E_{\text{пор}}}},$$

где  $B_{\min}$  – минимально возможная яркость предполагаемого объекта наблюдения, определяемая из условий применения ОЭС.

С использованием статистической модели ОЭС определяется значение  $\mu_{\text{пор}}$  для требуемой вероятности обнаружения. Затем при известной яркости  $B_{\text{шум}}$  необходимо проверить выполнение условия

$$\mu \geq \mu_{\text{пор}} \quad (12)$$

Для этого в (3) необходимо подставить значения  $B_{\text{шум}}$  и  $F$ . Полученную фоновую освещенность ПОИ и значение  $E_{\text{пор}}$  подставить в формулу (10) и вычислить значение  $\mu$ . В случае невыполнения условия (12) значение апертуры  $F$  необходимо увеличить и повторить проверку. Минимальное значение апертуры, при котором выполняется условие (12), будет определять пригодность ОЭС к накоплению энергии сигнала, которая необходима для его достоверного обнаружения [3].

Для измерения координат изображения точечного источника оптического излучения важнейшим требованием к параметрам ОЭС является погрешность измерения. Погрешность измерения положения фотоцентра изображения  $\sigma$  в кадре определяется угловым размером пиксела  $\theta$  и отношением «сигнал/шум»  $\mu$  при измерении координат объекта

$$\sigma = C_{\sigma} \frac{\theta}{\mu}, \quad (13)$$

где  $C_{\sigma}$  – безразмерный коэффициент пропорциональности. Точное значение коэффициента  $C_{\sigma}$  зависит от профиля распределения освещенности в изображении точечного источника излучения. Для распределения освещенности круглой формы полагаем, что  $C_{\sigma} = 1$ .

Угловой размер пиксела  $\theta$  связан с его линейным размером  $d$  и фокусным расстоянием объектива  $f'$  следующим соотношением

$$\theta = \frac{d}{f'}$$

Тогда формула (13) принимает вид

$$\sigma = C_{\sigma} \frac{d}{\mu \cdot f'}$$

При угловом движении космического аппарата, на котором установлено ОЭС, изображения объектов на ПОИ перемещаются, поэтому они занимают большее число пикселей, что приводит к смещению энергетического центра изображения и уменьшению отношения «сигнал/

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

шум». Максимально допустимая угловая скорость КА зависит от углового размера пиксела и времени экспонирования

$$V_{\max} = \frac{\theta \cdot n_{\omega}}{\tau_{\text{экс}}}, \quad (14)$$

где  $\theta$  – угловой размер пиксела;  
 $n_{\omega}$  – количество пикселов в треке;  
 $\tau_{\text{экс}}$  – время экспонирования.

Угловой размер пиксела определяется параметрами оптической системы и форматом матрицы фотоприемника. От него во многом зависят погрешности определения координат. Чем меньше угловой размер пиксела, тем погрешность будет ниже, так как расчет координат производится в долях пиксела. Но и максимальная угловая скорость будет ниже.

Для рассчитанных параметров проверяем их соответствие заданным требованиям. Если какое-либо из требований не выполняется, то необходимо рассматривать другой вариант конструкции. Результаты выполнения перечисленных действий можно поместить в таблицу вариантов конструкции. Кроме этого, выбор окончательного варианта из полученной таблицы должен основываться на критериях, учитывающих дополнительные требования к конструкции ЗД, доступность и стоимость комплектующих элементов и т.д. С целью повышения точности измерений, проводимых ОЭС, необходимо рассматривать основные источники систематических погрешностей и возможные пути их устранения. Таковыми источниками являются: абберация оптической системы, неоднородность чувствительности ПОИ, неоднородность темнового тока ПОИ, геометрические искажения ПОИ.

Таким образом, оптимальные параметры ОЭС рассчитываются исходя из технологических

возможностей производства оптических систем и матричного фотоприемника, условий функционирования прибора в процессе эксплуатации и возможностей бортового вычислительного комплекса. В результате в настоящее время невозможно получить ОЭС, удовлетворяющее сразу всем перечисленным выше требованиям. Возможно создание различных вариантов конструкции датчика, удовлетворяющих тем требованиям, которые разработчик считает основными.

### Заключение

Приведенная методика показывает взаимозависимость параметров и условий применения ОЭС. С ее помощью можно решать различные практические задачи, такие как:

- определение характеристик и показателей качества существующих ОЭС;
- доработка существующих ОЭС при изменении условий их эксплуатации;
- выбор параметров, исходя из условий применения и требований к качеству ОЭС.

### Литература

1. Арсеньев В.Н., Белихин Е.Н., Трофимов И.А. Определение параметров движения космического аппарата по результатам их измерений бортовыми и наземными измерительными средствами // Труды ВКА им. А.Ф. Можайского, 2019. Вып.668. С.81-89.
2. Проектирование оптико-электронных приборов. Под ред. Ю.Г. Якушенкова. М.: Логос, 2000. 488 с.
3. Сергеев В.А., Трофимов И.А. Оптико-электронные приборы навигации и ориентации космических аппаратов: учебное пособие. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2020. 229 с.



# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ



УДК 66.045.7

**МЕТОДИКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО  
РАСЧЕТА ВИТЫХ  
ТЕПЛООБМЕННИКОВ,  
ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ  
ПОЛУЧЕНИЯ СЖИЖЕННОГО  
МЕТАНА, ИСПОЛЬЗУЕМОГО В  
КАЧЕСТВЕ ГОРЮЧЕГО В РАКЕТНО-  
КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ**

**METHOD FOR PARAMETRIC  
CALCULATION OF TWISTED HEAT  
EXCHANGERS DESIGNED TO  
PRODUCE LIQUEFIED METHANE  
USED AS A FUEL IN ROCKET AND  
SPACE TECHNOLOGY**

**Алексей Александрович Коробков**

*почетный работник науки  
и высоких технологий РФ  
кандидат технических наук, доцент  
начальник научно-методического  
управления  
АНО «Институт инженерной физики»  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов,  
Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7 (496) 735-31-93  
E-mail: korobkow@iifmail.ru*

**Максим Васильевич Кулик**

*старший научный сотрудник  
научно-методического управления  
АНО «Институт инженерной физики»  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов,  
Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7 (903) 797-36-67  
E-mail: mklik@mail.ru*

**Альфья Абдрякибовна Садекова**

*младший научный сотрудник  
научно-методического управления  
АНО «Институт инженерной физики»  
Адрес: 119049, Москва, Ленинский пр-т, д. 4  
Тел.: +7 (916) 644-72-38  
E-mail: tienkiss83@mail.ru*

## Аннотация

Разработана методика, позволяющая проводить параметрический расчет витых теплообменников, выполненных из гладких труб и труб, оребренных накаткой (из цветных металлов или высоколегированных сталей) или проволокой (из меди), с одним потоком в межтрубном пространстве, а также с числом потоков от одного до шести в трубах, в которых происходит теплообмен, как между однофазными потоками, так и между потоками, изменяющими свое агрегатное состояние. Методика может применяться для теплообменных аппаратов, состоящих из труб, имеющих различную геометрию поверхности, которые навиваются на сердечник по спирали, предназначенных для получения различных криогенных веществ (азот, кислород, метан) в жидкой фазе, для дальнейшего использования, в том числе, и в ракетно-космической технике. Разработанная методика позволяет провести оптимизацию моделирующих расчетов априори выбранной конфигурации теплообменной поверхности.

**Ключевые слова:** адсорбционно-криогенная технология, гладкая труба, ракетно-космическая техника, сжиженный метан, теплообменный аппарат, труба с оребрением.

## Summary

A technique has been developed that allows for the parametric calculation of coiled heat exchangers made of smooth pipes and pipes finned with knurling (from non-ferrous metals or high-alloy steels) or wire (from copper), with one flow in the annulus, as well as with the number of flows from one to six in pipes in which heat exchange occurs, both between single-phase flows and between flows that change their state of aggregation. The developed technique can be used for heat exchangers consisting of pipes with different surface geometries, which are wound around the core in a spiral, designed to produce various cryogenic substances (nitrogen, oxygen, methane) in the liquid phase, for further use, including in rocket and space technology. The technique makes it possible to optimize the modeling calculations of a priori selected configuration of the heat exchange surface.

**Keywords:** adsorption-cryogenic technology, smooth tube, rocket and space technology, liquefied methane, heat exchanger, tube with fins.

## Введение

Повышение эффективности применения ракетных двигателей является важным направлением развития ракетно-космической техники [1].

Одним из вариантов реализации данного на-

правления является использование сжиженного метана (СМ) в качестве компонента криогенного ракетного топлива в жидкостных ракетных двигателях [2-6]. Кроме того, именно применение СМ в качестве горючего, позволяет реализовать

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

концепцию многоразового использования двигателей, а, соответственно, и ступеней космических транспортных систем (КТС) [7].

Наиболее надежным и эффективным способом получения СМ является способ, основанный на использовании адсорбционно-криогенной (АК) технологии [8]. Системы, построенные с целью получения криогенных веществ (в жидкой фазе) вообще и СМ, в частности, с применением АК-технологий по группе показателей надежности (продолжительность подготовки предпусковой, пусковая надежность, длительность работы и т.п.), существенно превосходят классические системы [9].

Одним из основных элементов АК-системы, обеспечивающим получение конечных продуктов (криогенных веществ в жидком состоянии) требуемого качества является теплообменный аппарат (ТОА) [10]. Применение ТОА позволяет понизить температуру теплоносителя до необходимой наиболее энергоэффективным способом [11].

В зависимости от условий применения, конкретной цели разработки ТОА, используемых криогенных веществ и т.п. для каждого конкретного случая целесообразно рассчитывать ТОА, который будет в наибольшей степени подходить, с точки зрения энергоэффективности, данной ситуации (рациональный или оптимальный ТОА).

В данной статье приводится описание методики расчета витых ТОА, которые предполагается использовать в качестве аппаратов для получения СМ, применяемого в жидкостных ракетных двигателях перспективных многоразовых КТС в качестве горючего.

## Методика расчета витых ТОА

Методика позволяет провести оптимизацию моделирующих расчетов априори выбранной конфигурации теплообменной поверхности. Задаваясь геометрией теплообменной поверхности и входными технологическими параметрами, возможно получение выходных технологических параметров и распределение по длине аппарата температур, паросодержаний, гидравлических сопротивлений и т.д.

### Исходные данные

Исходными данными для расчета являются рабочая среда теплообмениваемых потоков;  $G_1, G_2, V_1, V_2, Q, T_1', T_2', T_1'', T_2'', p_1, p_2, \Delta p_1, \Delta p_2, \Delta p, x_1, x_2$ , полученных из расчета материального и теплового баланса установки или принятых согласно техническому заданию на расчет ТОА [12-14],

где  $G_1$  – массовый расход потока трубного пространства;

$G_2$  – массовый расход потока межтрубного пространства;

$V_1$  – объемный расход потока трубного пространства;

$V_2$  – объемный расход потока межтрубного пространства;

$Q$  – количество тепла, передаваемого в единицу времени (тепловая нагрузка ТОА);

$T_1'$  – начальная температура потока трубного пространства;

$T_2'$  – начальная температура потока межтрубного пространства;

$T_1''$  – конечная температура потока трубного пространства;

$T_2''$  – конечная температура потока межтрубного пространства;

$p_1$  – давление потока трубного пространства;

$p_2$  – давление потока межтрубного пространства;

$\Delta p_1$  – гидравлическое сопротивление трубного пространства;

$\Delta p_2$  – гидравлическое сопротивление межтрубного пространства;

$\Delta p$  – перепад давлений;

$x_1$  – паросодержание во входном сечении трубного пространства;

$x_2$  – паросодержание в выходном сечении трубного пространства.

*Допущения* [13-15]:

- потоки распределены равномерно;
- аксиальная теплопроводность отсутствует;
- температуры потоков не зависят от поперечной координаты ТОА;
- процесс теплообмена – изобарный;
- гидравлические потери по потоку отсутствуют.

## 1. Расчет поверхности ТОА

Действительная площадь поверхности теплообмена [м<sup>2</sup>]:

$$F_d = F_p + \Delta F_p, \quad (1)$$

где  $\Delta F_p$  – запас поверхности (для ТОА с гладкими трубами  $\geq 10\%$ ; для ТОА из труб с оребрением накаткой  $\geq 30\%$ ) [м<sup>2</sup>];

$F_p$  – площадь поверхности теплообмена расчетная [м<sup>2</sup>]:

$$F_p = \frac{Q}{K \cdot \Delta T_{cp}}, \quad (2)$$

где  $Q$  – тепловая нагрузка ТОА [Вт];

$K$  – коэффициент теплопередачи [Вт/(м<sup>2</sup> К)];

$\Delta T_{cp}$  – разность температур потоков (средняя) [К]:

$$\Delta T_{cp} = \frac{\Delta T_{max} - \Delta T_{min}}{2,3 \cdot \lg \left( \frac{\Delta T_{max}}{\Delta T_{min}} \right)}, \quad (3)$$

где  $\Delta T_{max}$  – максимальная разность температур между теплообменивающимися потоками [К];

$\Delta T_{min}$  – минимальная разность температур между теплообменивающимися потоками [К].

Коэффициент теплопередачи:

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

●отнесенный к наружной поверхности труб, для ТОА с гладкими трубами [Вт/(м<sup>2</sup> К)]:

$$K_{zt} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} \cdot \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{2\delta_{cm}}{\lambda_m} \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}, \quad (4)$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи «трубного» потока, [Вт/(м<sup>2</sup> К)];

$\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи «межтрубного» потока, [Вт/(м<sup>2</sup> К)];

$\delta_{cm}$  – толщина стенки трубы [м];

$\lambda_m$  – теплопроводность материала труб [Вт/(м К)];

●отнесенный к наружной поверхности труб, для ТОА с трубами с оребрением накаткой [Вт/(м<sup>2</sup>·К)]:

$$K_{opn} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} \cdot \frac{F_2}{F_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{2\delta_{cm}}{\lambda_m} \cdot \ln\left(\frac{d_p}{d_1}\right)}, \quad (5)$$

$F_1$  – внутренняя поверхность трубы с оребрением накаткой, приходящаяся на единицу длины трубы [м];

$F_2$  – наружная поверхность трубы с оребрением накаткой, приходящаяся на единицу длины трубы [м].

Для определения значений коэффициентов теплоотдачи, входящих в коэффициент теплопередачи, необходимо задать геометрические характеристики теплопередающей поверхности:  $d_1, d_2, d_3, d_p, d_n, \delta_p, t_p, t_1, t_2$ , то есть выбрать тип аппарата и размеры элементов конструкции, из которых он компонуется.

Коэффициент теплоотдачи «трубного» потока, ( $\alpha_1$ ), [Вт/(м<sup>2</sup> К)]:

$$\alpha_1 = \frac{Nu_1 \cdot \lambda_1}{d_1}, \quad (6)$$

где  $Nu_1$  – число Нуссельта потока трубного пространства.

Число Нуссельта  $Nu_1$  потока трубного пространства для однофазных потоков определяется по формулам (14)-(17), для двухфазных потоков, при числах  $Re > 5 \cdot 10^3$ , вычисляется по формуле:

$$Nu = 0,024 \cdot Re_1^{0,8} \cdot Pr_1^{0,43} \cdot 0,5 \cdot \left[ \sqrt{1+x_1 \cdot \left(\frac{\rho_1'}{\rho_1''} - 1\right)} + \sqrt{1+x_2 \cdot \left(\frac{\rho_1'}{\rho_1''} - 1\right)} \right], \quad (7)$$

где  $Re_1$  – число Рейнольдса потока трубного пространства;

$Pr_1$  – число Прандтля потока трубного пространства;

$\rho_1'$  – плотность конденсата, [кг/м<sup>3</sup>];

$\rho_1''$  – плотность пара [кг/м<sup>3</sup>];

Отношение  $(d_1/2R)$  определяет среднюю относительную кривизну навивки ТОА. В первоначальном варианте задается  $R = (10 \div 15) \cdot d_2$ , с последующим уточнением по результатам расчета.

Значения числа Нуссельта ( $Nu$ ), а также коэффициента сопротивления трения ( $\xi$ ) потока трубного пространства для однофазных потоков

(в зависимости от числа Рейнольдса ( $Re$ ) и относительной кривизны навивки ( $A$ )):

●для  $A = [(d_1/2R) < 0,0123]$ :

$$Nu = \begin{cases} 3,66, & \text{при } Re < 2,3 \cdot 10^3; \\ 3,66 \cdot \left(\frac{Re}{2,3 \cdot 10^3}\right)^{(3+\lg Pr)}, & \text{при } 2,3 \cdot 10^3 < Re < 4 \cdot 10^3; \\ 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,33}, & \text{при } Re > 4 \cdot 10^3; \end{cases} \quad (8)$$

$$\xi = \begin{cases} \frac{64}{Re}, & \text{при } Re < 2,3 \cdot 10^3; \\ \frac{0,3164}{Re^{0,25}}, & \text{при } 2,3 \cdot 10^3 < Re < 4 \cdot 10^3; \\ \frac{0,3164}{Re^{0,25}}, & \text{при } Re > 4 \cdot 10^3; \end{cases} \quad (9)$$

●для  $A = [(d_1/2R) \geq 0,0123]$ :

$$Nu = \begin{cases} 3,65 + 0,08 \cdot \left[1 + 0,8 \cdot \left(\frac{d_1}{2R}\right)^{0,9}\right] \cdot Re^{[0,5+0,29 \cdot \left(\frac{d_1}{2R}\right)^{0,194}]} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}, & \text{при } 10^2 < Re < Re_{sp}; \\ 0,023 \cdot \left[1 + 14,8 \cdot \left(1 + \frac{d_1}{2R}\right) \cdot \left(\frac{d_1}{2R}\right)^{\frac{1}{3}}\right] \cdot Re^{[0,8-0,22 \cdot \left(\frac{d_1}{2R}\right)^{0,01}]} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}, & \text{при } Re_{sp} < Re < 2,2 \cdot 10^4; \\ 0,023 \cdot \left[1 + 3,6 \cdot \left(1 - \frac{d_1}{2R}\right) \cdot \left(\frac{d_1}{2R}\right)^{0,8}\right] \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}, & \text{при } 2,2 \cdot 10^4 < Re < 1,5 \cdot 10^5; \end{cases} \quad (10)$$

$$\xi = \begin{cases} \frac{64}{Re} \cdot \left[1 + 0,14 \cdot \left(\frac{d_1}{2R}\right)^{0,97}\right] \cdot Re^{[-0,644 \cdot \left(\frac{d_1}{2R}\right)^{0,317}]}, & \text{при } 10^2 < Re < Re_{sp}; \\ \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \cdot \left[1 + 2,88 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{d_1}{2R}\right)^{0,62}\right], & \text{при } Re_{sp} < Re < 2,2 \cdot 10^4; \\ \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \cdot \left[1 + 0,0823 \cdot \left(1 + \frac{d_1}{2R}\right) \cdot \left(\frac{d_1}{2R}\right)^{0,53}\right] \cdot Re^{0,25}, & \text{при } 2,2 \cdot 10^4 < Re < 1,5 \cdot 10^5, \end{cases} \quad (11)$$

где  $R$  – средний радиус закругления змеевика [м];

$$Re_{sp} = 2,3 \cdot 10^3 \cdot \left[1 + 8,6 \cdot \left(\frac{d_1}{2R}\right)^{0,45}\right].$$

Зависимости (8)-(11), учитывающие кривизну навивки, необходимо использовать только при известных геометрических размерах навивки.

Число Рейнольдса потока трубного пространства определяет режим течения рабочей среды и вычисляется по формуле

$$Re = \frac{w_1 \cdot d_1 \cdot \rho_1}{\mu_1}, \quad (12)$$

где  $w_1$  – скорость потока в трубном пространстве [м/с];

$\mu_1$  – динамическая вязкость потока трубного пространства [Па·с].

Скорость газового потока в трубном пространстве  $w_1$  изменяется в интервале  $3 \div 30$  м/с, для первоначальных расчетов скорость может быть принята:  $w_1 = 10$  м/с.

Скорость потока жидкости в трубном пространстве  $w_1$  изменяется в интервале  $0,05 \div 3$  м/с, для первоначальных расчетов может быть принята –  $w_1 = 1$  м/с.

Значения  $\rho_1, \lambda_1, \mu_1, c_{p1}$  определяются по программе теплофизических свойств криогенных

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

веществ «TEFIS-3.1» [16] при средней температуре потока трубного пространства  $T_{1cp}$ :

$$T_{1cp} = \frac{T_1' + T_1''}{2}, \quad (13)$$

где  $T_1'$  – температура потока внутри трубы (начальная) [K];

$T_1''$  – температура потока внутри трубы (конечная) [K].

Число Прандтля потока трубного пространства рассчитывается по формуле:

$$Pr_1 = \frac{c_p \cdot \mu_1}{\lambda_1}, \quad (14)$$

где  $c_p$  – удельная изобарная теплоемкость [Дж/(кг·K)];

$\lambda_1$  – теплопроводность потока трубного пространства [Вт/(м·K)].

Площадь поверхности трубы с оребрением накаткой (внутренняя), отнесенная к длине трубы в 1 м (внутренняя удельная площадь поверхность трубы) [м]

$$F_1 = \pi \cdot d_1. \quad (15)$$

Площадь поверхности трубы с оребрением накаткой (наружная), отнесенная к длине трубы в 1 м (наружная удельная площадь поверхности трубы) [м]

$$F_2 = \pi \cdot d_n + \left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot (d_p^2 - d_n^2) \cdot \left(\frac{1}{t_p}\right). \quad (16)$$

Коэффициент теплоотдачи «межтрубного» потока [Вт/(м<sup>2</sup>·K)]

$$\alpha_2 = \frac{Nu_2 \cdot \lambda_2}{d_2}, \quad (17)$$

где  $Nu_2$  – число Нуссельта потока межтрубного пространства;

$\lambda_2$  – теплопроводность потока межтрубного пространства [Вт/(м·K)].

Число Нуссельта потока межтрубного пространства определяется по формуле

$$Nu_2 = A \cdot Re_{2co}^n, \quad (18)$$

где  $Re_{2co}$  – число Рейнольдса потока межтрубного пространства;

$A, n$  – коэффициенты, определяемые по таблице 1 (для ТОА с гладкими трубами) и по таблице 2 (для ТОА с трубами с оребрением накаткой).

**Таблица 1**

Значения коэффициентов A, n, C, K для ТОА с гладкими трубами

Тип навивки	Относительные шаги навивки		Число Рейнольдса, $Re_{2co}$	Значения коэффициентов			
	$\sigma_1 = t_1/d_2$	$\sigma_2 = t_2/d_2$		A	n	C	K
Плотная	1,15	1,0	2 000÷3 000	0,0185	0,95	8,1	0,21
Разряженная	1,1	1,2	1 000÷30 000	0,083	0,85	33,8	0,21
	1,2					5,6	0,10
	1,15	1,3	1 500÷30 000			6,4	0,10

**Таблица 2**

Значения коэффициентов A, n, C, K для ТОА с трубами с оребрением накаткой

Диаметр заготовки, $D_{заг}$ , мм	Толщина ребра, $\delta_r$ , мм	Диаметр поверхности трубки оребренной (несущий), $d_{nr}$ , мм	Диаметр трубы (внутренний), $d_1$ , мм	Толщина прокладки, $\sigma_{пр}$ , мм	Диаметр ребра (наружный), $d_{pr}$ , мм	Шаг оребрения, $t_p$ , мм	Число Рейнольдса, $Re_{2co}$	Коэффициент оребрения, $\phi$	Значения коэффициентов			
									A	n	C	K
12	0,4	10,0	8	-	17,0	2	470÷5 090	7,15	0,07	0,82	15,0	0,25
12	0,4	10,0	8	2	17,0	2	400÷5 200	7,15	0,06	0,82	13,2	0,25
12	0,4	10,0	8	-	14,3	1,85	500÷4 500	4,75	0,12	0,74	21,4	0,25
12	0,4	10,0	8	2	14,3	1,85	490÷4 800	4,75	0,12	0,74	13,3	0,25
13	-	10,5	7	-	16,5	2	400÷6 000	7,31	0,07	0,82	15,0	0,25
13	0,3	10,5	7	2	16,5	2	400÷6 000	7,31	0,06	0,82	13,2	0,25
13	0,3	10,5	7	4	16,5	2	400÷6 000	7,31	0,22	0,65	13,2	0,25

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Число Рейнольдса потока межтрубного пространства, определяет режим течения рабочей среды и вычисляется:

● для ТОА с гладкими трубами по формуле

$$Re_{2co} = \frac{w_{2co} \cdot d_2 \cdot \rho_2}{\mu_2}, \quad (19)$$

где  $w_{2co}$  – скорость «межтрубного» потока по отношению к сечению свободного объема (среднему) [м/с];

$\mu_2$  – динамическая вязкость «межтрубного» потока [Па·с];

$\rho_2$  – плотность «межтрубного» потока (при рабочих условиях) [кг/м<sup>3</sup>];

● для ТОА с трубами с оребрением накаткой по формуле

$$Re_{2co} = \frac{w_{2co} \cdot d_n \cdot \rho_2}{\mu_2}. \quad (20)$$

Для первоначальных расчетов скорость «межтрубного» потока по отношению к сечению свободного объема (среднему), для ТОА с гладкими трубами и с трубами с оребрением накаткой может быть принята  $w_{2co} = 1$  м/с.

Значения  $\rho_2$ ,  $\lambda_2$ ,  $\mu_2$ ,  $c_{p2}$  определяются по программе «TEFIS-3.1» [16], при температуре «межтрубного» потока (средней)

$$T_{2cp} = \frac{T_2' + T_2''}{2}, \quad (21)$$

где  $T_2'$  – температура «межтрубного» потока (начальная) [К];

$T_2''$  – температура «межтрубного» потока (конечная) [К].

## 2. Расчет геометрических параметров теплообменной поверхности

Расчет включает в себя:

1) расчет площади поперечного сечения ТОА;

2) определение расчетного наружного диаметра навивки (внутреннего диаметра обечайки);

3) расчет истинного внутреннего диаметра обечайки;

4) расчет высоты навивки;

5) расчет среднего диаметра слоя навивки;

6) расчет числа труб по слоям (заходность);

7) расчет числа рядов труб в слое;

8) расчет среднего радиуса закругления змеевика;

9) расчет средней длины трубки в каждом слое.

2.1. Расчет площади поперечного сечения ТОА

$$F_{сеч} = \frac{\pi}{4} \cdot d_c^2 + \frac{f_{co}}{f^{y\partial}}, \quad (22)$$

где  $f_{co}$  – площадь сечения (среднего) свободного «межтрубного» объема [м<sup>2</sup>];

$f^{y\partial}$  – удельное свободное сечение межтрубного пространства [м<sup>2</sup>/м].

Определение диаметра сердечника<sup>1</sup>

$$d_c = (10 \div 20) \cdot d_2 \quad (23)$$

Расчет площади сечения (среднего) свободного «межтрубного» объема

$$f_{co} = \frac{V_2 \cdot \rho_{02}}{\rho_2 \cdot w_{2co}}, \quad (24)$$

где  $\rho_{02}$  – плотность потока межтрубного пространства (при н.у.) [кг/м<sup>3</sup>].

Значения  $\rho_2$ ,  $\rho_{02}$  определяются при средней температуре потока по программе «TEFIS-3.1».

Расчет удельного свободного сечения ТОА из гладких труб при расчете по скорости в отношении к сечению свободного объема (среднему)

$$f_{ср}^{y\partial} = 1 - \frac{\pi}{4} \cdot \frac{d_2^2}{t_1 \cdot t_2}. \quad (25)$$

Расчет удельного свободного сечения ТОА из труб, оребренных накаткой, при расчете по скорости в отношении к сечению свободного объема (среднему)

$$f_n^{y\partial} = 1 - \frac{\pi}{4} \cdot \frac{d_2^2}{t_1 \cdot t_2} \cdot \left[ d_n + (d_p^2 - d_n^2) \cdot \frac{\delta_p}{t_p} \right]. \quad (26)$$

2.2. Определение расчетного наружного диаметра навивки (внутреннего диаметра обечайки)

$$d_{обп} = \sqrt{\frac{\pi}{4} \cdot F_{сеч}}, \quad (27)$$

где  $F_{сеч}$  – площадь поперечного сечения ТОА [м<sup>2</sup>].

2.3. Расчет истинного внутреннего диаметра обечайки

$$d_{об} = d_c + 2 \cdot n_{сл} \cdot t_1, \quad (28)$$

где  $n_{сл}$  – число слоев навивки.

Определение числа слоев навивки<sup>1</sup>

$$n_{сл} = \frac{d_{обп} - d_c}{2 \cdot t_1}. \quad (29)$$

Определение отличия истинного проходного сечения обечайки от расчетного сечения<sup>2</sup>

$$\Delta f = \left( 1 - \frac{d_{об}^2 - d_c^2}{d_{обп}^2 - d_c^2} \right) \cdot 100. \quad (30)$$

2.4. Расчет высоты навивки<sup>2</sup>

$$H = \frac{2 \cdot n_{мп} \cdot L_{ср} \cdot t_2}{\pi \cdot (d_{об} - d_c) \cdot n_{сл} \cdot \cos \beta}, \quad (31)$$

где  $n_{мп}$  – количество труб;

$L_{ср}$  – средняя длина трубы [м].

<sup>1</sup> Большие значения принимаются для труб с тонкими стенками.

<sup>2</sup> Значение псл следует округлять до целого, после чего необходимо уточнить диаметр обечайки (внутренний).

<sup>3</sup> В случае если  $\Delta f > 10\%$ , то в расчет поверхности теплообмена  $F_d$  следует внести поправку.

<sup>4</sup> Отношение высоты навивки  $H$  к внутреннему диаметру обечайки  $do_{об}$  меньше 0,6 ( $(H/do_{об}) < 0,6$ ) применять не рекомендуется.

<sup>5</sup> Полученное значение  $n_{тр}$  округляется до целого числа. Допускается округление в пределах  $(1 \pm 0,05)$   $n_{тр}$  условий размещения труб в решетке [11].

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Определение числа труб<sup>3</sup>

$$n_{mp} = \frac{4 \cdot V_1 \cdot \rho_{01}}{3600 \cdot \pi \cdot d_1^2 \cdot w_1 \cdot \rho_1}. \quad (32)$$

Определение средней длины трубы:

• с гладкой поверхностью

$$L_{cp_{cl}} = \frac{F_d}{\pi \cdot d_2 \cdot n_{mp}}; \quad (33)$$

• с оребрением накаткой

$$L_{cp_{op}} = \frac{F_d}{F_2 \cdot n_{mp}}. \quad (34)$$

Определение угла наклона навивки труб к диаметральной плоскости

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{2 \cdot n_{mp} \cdot t_2}{\pi \cdot (d_{об} - d_c) \cdot n_{cl}}. \quad (35)$$

2.5. Расчет среднего диаметра слоя навивки

$$d_{cl} = d_c + t_1 \cdot (2 \cdot n_c - 1). \quad (36)$$

где  $n_c$  – порядковый номер слоя (от 1 до 3).

2.6. Расчет числа труб по слоям (заходность)

$$n_{зах} = \frac{2 \cdot n_{mp} \cdot d_{cl}}{n_{cl} \cdot (d_{об} + d_c)} \quad (37)$$

Полученные значения  $n_{зах}$  для каждого слоя округляются до целого числа так, чтобы выполнялось равенство

$$\sum_1^{n_{cl}} n_{зах} = n_{mp}. \quad (38)$$

2.7. Расчет числа рядов труб в слое

$$n_p = \frac{H \cdot \cos \beta}{t_2}. \quad (39)$$

2.8. Расчет среднего радиуса закругления змеевика

$$R = \frac{d_{об} + d_c}{4}. \quad (40)$$

2.9. Расчет средней длины трубки в каждом слое

$$L_{cl} = \pi \cdot d_{cl} \cdot n_{в\,cl}. \quad (41)$$

Определение числа витков труб в слое

$$n_{в\,cl} = \frac{n_p}{n_{зах}}. \quad (42)$$

### 3. Расчет гидравлического сопротивления

Общее падение давления складывается из потерь давления во входных и выходных патрубках, коллекторах, в трубных пучках и т.д. Основные потери давления имеют место в частях ТОА, образующих поверхность теплообмена. Эти потери зависят от теплофизических свойств рабочих сред, их расходов, геометрических характеристик теплообменной поверхности. Гидравлические сопротивления в зависимости от природы их возникновения делятся на сопротивления трения и местные сопротивления. Расчет гидравлического сопротивления сводится к определению падения давления в трубном и межтрубном пространствах ТОА.

Определение гидравлического сопротивления в трубном пространстве:

• для однофазных потоков  $\Delta p_1$  рассчитывается по формуле

$$\Delta p_1 = \xi_1 \cdot \frac{L_{cp} \cdot \rho_1 \cdot w_1^2}{d_1 \cdot 2}, \quad (43)$$

где  $\xi_1$  – коэффициент сопротивления трения трубного пространства<sup>3</sup>;

• для двухфазных потоков  $\Delta p_1$  при числах  $Re > 5 \cdot 10^3$  рассчитывается по формуле:

$$\Delta p_1 = 1,5 \cdot \xi_1 \cdot \frac{L_{cp} \cdot \rho_1 \cdot w_1^2}{d_1 \cdot 2} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{x_1 + x_2}{2} \right) \cdot \left( \frac{\rho_1'}{\rho_1} - 1 \right) \right]. \quad (44)$$

Определение гидравлического сопротивления межтрубного пространства ( $\Delta p_2$ ), Па

$$\Delta p_2 = n_p \cdot \left( \frac{Eu_{2co}}{n_p} \right) \cdot \rho_2 \cdot w_{2co}^2, \quad (45)$$

где  $Eu_{2co}$  – число Эйлера «межтрубного» потока, в отношении к сечению свободного объема (среднему);

Отношение  $\left( \frac{Eu_{2co}}{n_p} \right)$  определяется из выражения

$$\frac{Eu_{2co}}{n_p} = C \cdot Re_{2co}^{-K}. \quad (46)$$

Значения коэффициентов  $C, K$  в этом уравнении для гладких труб представлены в таблице 1, а для труб с оребрением накаткой в таблице 2.

Расчет ТОА считается законченным, если заданные и расчетные значения гидравлического сопротивления ( $\Delta p_1$  и  $\Delta p_2$ ) отличаются не более чем на 10%.

В случае расхождения заданных и расчетных значений гидравлических сопротивлений более чем на 10% в ту или иную сторону, расчет поверхности теплообмена повторяется с учетом полученных результатов. При этом задаются новые значения скоростей потоков  $w_1$  и  $w_2$  ( $w_{2co}$ ).

### Заключение

Разработанная методика может применяться для ТОА, состоящих из труб, имеющих различную геометрию поверхности, которые навиваются на сердечник по спирали. Методика позволяет провести оптимизацию моделирующих расчетов априори выбранной конфигурации теплообменной поверхности.

С помощью разработанной методики выявлено, что:

• ТОА с оребренными трубами следует применять тогда, когда отношение коэффициента теплоотдачи потока внутри труб к соответствующему коэффициенту в межтрубном пространстве – в 3-5 раз больше;

• применение в ТОА труб с оребрением позволяет увеличить площадь наружной поверхности труб за счет оребрения, тем самым – улучшая тепловые характеристики ТОА, одновременно уменьшая его массогабаритные характеристики;

• ТОА с плотной навивкой являются менее

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

эффективными по сравнению с аппаратами с разреженной навивкой;

●ТОО с гладкими трубами следует применять в случаях близости значений коэффициента теплоотдачи потоков в трубном и межтрубном пространстве.

Ценность разработанной методики состоит в ее универсальности, в том, что она позволяет проводить параметрический расчет витых ТОО, выполненных из гладких труб и труб, оребренных накаткой (из цветных металлов или высоколегированных сталей) или проволокой (из меди), с одним потоком в межтрубном пространстве и с числом потоков от одного до шести в трубах, в которых происходит теплообмен, как между однофазными потоками, так и потоками, изменяющими свое агрегатное состояние.

### Литература

1. Катков Р.Э., Лозино-Лозинская И.Г., Мосолов С.В., Скоромнов В.И., Смоленцев А.А., Соколов Б.А. и др. Экспериментальная отработка камеры сгорания многофункционального жидкостного ракетного двигателя с кислородным охлаждением камеры: результаты 2009-2014 гг. // Космическая техника и технологии. Королев: РКК «Энергия» им. С.П. Королева, 2015. №4 (11). С.12-24.
2. Домашенко А.М., Довбиш А.А. Технология получения сжиженного метана – компонента ракетного топлива // Матер. 3-й междунар. НПК «Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» (19-20.11.2019). М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. С.108-115.
3. Лавреченко Г.К. Актуальные проблемы производства и использования КПП и СПГ // Технические газы. Одесса: ООО «Институт низкотемпературных энерготехнологий», 2012. №3. С.2-10.
4. Брегвадзе Д.Т., Габидулин О.В., Гуркин А.А., Заболотько И.А. Применение топлива «кислород + метан» в жидкостных ракетных двигателях // Политехнический молодежный журнал, 2017. №12. С.11-13.
5. Андреев Е.А., Новиков А.В., Шацкий О.Е. Расчетное и экспериментальное исследование надежности запуска и выхода на режим ракетного двигателя малой тяги на газообразных компонентах кислород + метан с электроискровым зажиганием // Инженерный журнал: наука и инновации, 2017. № 4.
6. Карпов А.Б. Перспективы использования сжиженного природного газа в качестве топлива ракетных двигателей // Матер. IV всерос. конф. «Химия и химическая технология: достижения и перспективы (27-28 ноября 2018)». М.: Изд-во РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2018. С.408.1-408.3.
7. Метановые ракетные двигатели и многообразные космолеты (Беларусь). [Электронный ресурс]: [https://www.ao.by/articles/articles\\_1454.html](https://www.ao.by/articles/articles_1454.html) (дата обращения: 25.10.2022).
8. Редькин В.В., Смородин А.И., Сергеев С.С., Кулик М.В., Коробков А.А. Конкурирующие варианты структурно-технологических схем азотных адсорбционно-криогенных установок криотермовакuumных камер для термовакuumных испытаний космических аппаратов // Известия Института инженерной физики, 2020. №1(55). С.24-31.
9. Воронежский А.В. Сравнительная оценка эффективности применения криогенной и адсорбционной технологий для производства кислорода с чистотой 93% // Главный механик, 2020. №7. С.54-67.
10. Коробков А.А., Кулик М.В., Редькин В.В., Сергеев С.С., Смородин А.И. Структурно-технологическая схема азотной системы охлаждения сжиженного метана для заправки ракеты-носителя среднего класса // Вестник Международной академии холода. С-Пб.: МАХ, 2020. №4. С.27-36.
11. Смородин А.И., Сергеев С.С., Кулик М.В., Коробков А.А. Научно-методический аппарат расчета детандер-компрессорного агрегата структурно-технологической схемы адсорбционно-криогенной установки // Известия Института инженерной физики, 2020. №3(57). С.2-9.
12. Khurmamatov A.M., Rakhimov G.B. Calculation of heat transfer and heat transfer in a pipe apparatus in heating gas condensate // Scientific and technical journal of NamIET. 2021. Vol. 6. Issue (1).
13. Wu J., Zhao J., Sun X., Liu S., Wang M. Design Method and Software Development for the Spiral-Wound Heat Exchanger with Bilateral Phase Change // Applied Thermal Engineering, 2020. Vol.166. P.114674.
14. Bartkus G.V., Kuznetsov V.V. Local characteristics of two-phase gas-liquid flow in a microchannel downstream of t-shaped mixer. Proc. 16th Intern. Heat Transfer Conf. IHTC-16. Beijing. China. 10-15 Aug. 2018. IHTC16-22909.
15. Ziskind G. Enhancing heat transfer in phase change materials. Proc. 16th Intern. Heat Transfer Conf. IHTC-16. Beijing, China, 10-15 Aug. 2018. IHTC16-KN18.
16. Программа TEFIS-3.1 Расчет термодинамических свойств криогенных веществ. (США). [Электронный ресурс]: <https://bib.convdocs.org> (дата обращения: 25.10.2022).

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 53.023; 53.06; 781.1

## МОНИТОРИНГ ПЕРИОДА МУЛЬТИВИБРАТОРА КАК СПОСОБ ИЗУЧЕНИЯ УНИВЕРСАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УТРАИВАЮЩИХСЯ ПЕРИОДОВ

## MONITORING THE MULTIVIBRATOR PERIOD AS A WAY OF STUDYING THE UNIVERSAL PERIOD-TRIPLING SYSTEM

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

**Алексей Олегович Платонов**

аспирант  
Институт теоретической и  
экспериментальной биофизики РАН  
Адрес: 142290, Московская обл., г. Пущино,  
ул. Институтская, д. 3  
Тел.: +7 (4967) 73-92-62  
E-mail: amniziya28@ya.ru

**Вадим Николаевич Лесных**

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

### Аннотация

Многие исследователи в разное время уже сообщали о наблюдении в системах самой разной природы феномена, который мы сейчас называем универсальной системой утраивающихся периодов (УСУП). Первое упоминание об этом явлении (как о Global Scaling) мы связываем с именем Х. Мюллера. Существенный вклад в изучение УСУП внес С. Петц, предложивший для периодов изучаемого им явления (названного Extra-Universal Wave Series) эмпирическую формулу  $T_{k,m} = T_0 * 3^k / 2^m$ , где константа  $T_0 = 114,572218767559$  лет, а  $k$  и  $m$  – небольшие целые числа. В диапазон известных масштабов времени укладывается около 125 утроений периода. Мы наблюдаем УСУП, мониторинга в экспериментах приблизительно одногогерцовый период мультивибратора. Т.к. частоты фронтов электрических колебаний этого устройства лежат в мегагерцовом масштабе, а мониторинг длится около недели или месяца, диапазон мониторинга занимает около 25 утроений периода. Поскольку это пятая часть всей УСУП, мониторинг периода мультивибратора может дать представление о многих свойствах УСУП. Если периоды универсальной системы утраивающихся периодов действительно так стабильны, как вычислил С. Петц, они могут послужить перспективной основой для создания высокопрецизионных технических устройств.

**Ключевые слова:** мультивибратор, универсальная система утраивающихся периодов, мониторинг, глобальное масштабирование, экстремально-универсальная серия волн, прецизионные измерения.

### Summary

The observation in systems of very different nature of the phenomenon, which we now call the universal period-tripling system (UPTS), was reported at different times by many researchers. The first mention of this phenomenon (as the Global Scaling) we associate with the Hartmut Mueller name. A significant contribution to the study of the UPTS was made by Stephen J. Puetz, who proposed for the periods of the phenomenon he studied (the Extra-Universal Wave Series) the empirical formula  $T_{k,m} = T_0 * 3^k / 2^m$ , where the constant  $T_0 = 114.572218767559$  years, and  $k$  and  $m$  are small integers. About 125 triples of the period fit into the range of known time scales. In experiments, we observe the UPTS by monitoring the approximately one-hertz period of the multivibrator. Since the frequencies of the fronts of the electrical oscillations of this device lie on the megahertz scale, and monitoring lasts about week and month, the monitoring range takes about 25 triples of the period. Since this is the fifth part of the entire UPTS, monitoring the multivibrator period can give an idea of many properties of the UPTS. If the periods of the universal period-tripling system are really as stable as S. Puetz has calculated, they can serve as a promising basis for the creation of precise technical devices.

**Keywords:** multivibrator, the universal period-tripling system, monitoring, Global scaling, Extra-Universal Wave Series, precision measurements.

### Введение

УСУП – это универсальная система утраивающихся периодов, описываемых формулой

$T_{k,m} = T_0 * 3^k / 2^m$ , где  $k$  и  $m$  – небольшие целые числа, а  $T_0 = 114,572218767559$  лет. Существование УСУП многократно обнаруживалось в самых

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

разных системах различными исследователями. Первым здесь был, по-видимому, Хартмут Мюллер, опубликовавший свои пионерские результаты по Global Scaling в СССР и продолживший свои многолетние исследования над этой темой уже в Германии [1], см. также [2-5]. Последним из известных нам независимых исследователей УСУП (под именем Extra-Universal Wave Series) стал американец Стефен Петц, который сначала самостоятельно [6,7], а потом с соавторами из США и Канады [8], продлил диапазон наблюдаемых периодов  $T_{k,m}$  от геофизических процессов до явлений астрофизических и даже космологических масштабов. С. Петцем проиллюстрирована широко представленная в самых различных природных процессах последовательность периодических колебаний с периодом, отличающимся втрое, в 9, 27 и т.п. раз. Эти колебания получили у Петца название вне-вселенских волновых рядов (EUWS). Он также нашел, что они простираются далеко за пределы наблюдаемой вселенной. В принципе, это не противоречит современному сценарию космологической инфляции, который допускает, что сейчас наблюдается лишь ничтожная часть постинфляционной вселенной. Совокупность этих колебаний обнаружена С. Петцем к 2008 году и обнародована в 2009 году в книге «Единая теория циклов...» [6]. Многие из этих циклов были обнаружены поодиночке еще до 2008 года. Это, например, ~516-летний климатический цикл, определяемый по океанским отложениям, ~1547-летний климатический цикл Дансгарда-Эшгера, ~4640-летний климатический цикл Бонда, ~125-тысячелетний климатический цикл, ~30-миллионнолетний цикл вымираний и ~822-миллионнолетний цикл в формировании земной коры. Представив эти циклы частью бесконечной гармонической последовательности, «Единая теория циклов» С. Петца обеспечила качественный прорыв в формулировке допущения о существовании этого феномена: «... Каким бы невероятным это ни показалось, отдельные длины волн в последовательности циклов отличаются от длин волн соседних циклов точно в три раза. Обнаруженная связь подсказывает, что утраивающиеся циклы имеют общее происхождение. Независимо от того, является ли частота EUWS столь короткой, как 9,57 дня, или же столь длинной, как 22,2 миллиарда лет, источник этих колебаний должен быть одним и тем же. До сих пор геологи концентрировались на внутренних процессах системы Земли, чтобы объяснить вулканические эпизоды, когда, по сути, колебания скорости звездообразования предполагают, что эти колебания уже формировали нашу Вселенную еще до возникновения Земли».

С. Петцем была получена первая эмпирическая формула для EUWS и продемонстрированы многочисленные проявления этих колебаний в природе. Наличие периодов EUWS может быть обнаружено в самых разнообразных процессах, включая колебания интенсивности звездообразования, эпизодов вулканизма, глобальные колебания климата, эволюцию новых семейств генов, циклы массового вымирания, пятна на Солнце и звездах, циклы цивилизации и даже циклы паники на биржах [7]. Впоследствии С. Петц сфокусировал свою деятельность на анализе периодичности земной геомагнитной переполусовки, а также на анализе периодичности в образовании земных гранитов, звезд, квазаров, на вспышках сверхновых и на результатах регистрации космических гамма-всплесков. Он попытался увидеть аналогичную периодичность в других типах данных, рассчитывая, что качество их синхронизации может указывать на вероятные причинно-следственные связи с геомагнитной переполусовкой. Для решения этой задачи все доступные новые записи временных рядов по этим научным направлениям были проверены на предполагаемую цикличность. Использовался спектральный анализ и методы взаимной корреляции с запаздыванием по времени. В результате С. Петцем были выявлены ожидаемые циклы с утраивающимся периодом; например, они составляют 30.44, 91.33, 274, 822 и 2466 миллионов лет, что соответствует модели С. Петца о существовании в разных масштабах вселенной единой утраивающейся периодичности. На основании полученных результатов возникла гипотеза о фрактальности Вселенной в достаточно широком диапазоне масштабов [8]. Эта гипотеза породила вторую гипотезу Петца – о существовании некой субэлектронной фрактальной материи (СФМ). Эта гипотетическая ультра-микро-материя могла бы играть роль динамической среды для крупномасштабных синхронизирующих волн, вызывающих циклы в астрономических и геологических процессах. Согласно этой гипотезе, грубо говоря, СФМ периодически сжимается и разжимается в соответствии со стандартными законами, известными для механических волн. Сжатия и декомпрессии СФМ способствуют осцилляциям свойств среды и вызывают нестабильность, приводящую к значимым астрономическим и геологическим эпизодам [9]. Конкретная природа СФМ, а также механизм, поразительно аккуратно передающий ее микро-осцилляции в макромасштабы, оставались неопределенными.

Первое уточнение представлений об УСУП было представлено С. Петцем с соавтора-

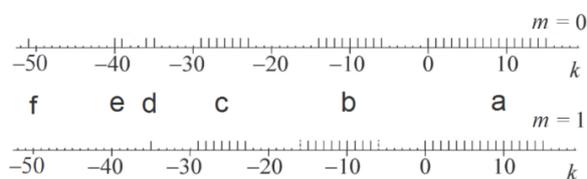
## ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

ми в 2015 г., когда впервые появилась формула  $T_{k,m} = T_0 * 3^k / 2^m$ , (см. например, [10]). Ранее она существовала в двух частных видах: full period  $T_k = T_0 * 3^k = T_0 * 3^k / 2^0$  и half-period  $T_k = T_0 * 3^k / 2 = T_0 * 3^k / 2^1$ . Примерно в то же время мы тоже пришли (публикация запоздала по не зависящей от нас причине) к финальному двухпараметрическому виду формулы Петца [11]. Зато в этот период мы впервые нашли доводы в пользу того, что параметр  $m$  в формуле Петца может иметь не только положительные, но и отрицательные значения.

Стартовав от ранних результатов С. Петца, акцентировавшего свое внимание на очень долгопериодических процессах, мы с нашими соавторами последовательно проследили справедливость формулы Петца в область коротких и ультракоротких периодов и достигли области оптических частот на частных примерах адаптации к УСУП зрения человека и зрения птиц [12 - 20].

Таким образом, вместе с С. Петцем, а также с его и с нашими соавторами мы нашли, что диапазон УСУП составляет, по крайней мере, 30 десятичных порядков (рисунк 1).

Наблюдая УСУП в повседневном эксперименте, мы сейчас используем мультивибратор [22], дающий электрические колебания в форме меандра с удобной для практического использования частотой  $\sim 1$  Гц. При этом его резкие фронты лежат уже в мегагерцовом масштабе частот, т.е. в характерной для УСУП логарифмической шкале при этом охватывается около 10% диапазона УСУП. Измерения периода мультивибратора нередко продолжаются даже месяца, в совокупности это дает уже более 20% всего диапазона УСУП. В процессе мониторинга наблюдаются дискретные значения периода, ха-



**Рис. 1.** Представленный в логарифмическом масштабе времени диапазон УСУП. Вертикальными штрихами помечены обнаруженные периоды, описываемые формулой  $T_{k,m} = T_0 * 3^k / 2^m$  в ее раннем представлении full и half периодов, т.е. при  $m=0$  и 1. Здесь,  $a$  – астрономические, геологические и биологические периоды  $T_{k,m}$ , входящие в диапазон  $k=0 \div 15$ , они описаны в [6-10],  $b$  и  $c$  – это биофизические периоды  $T_{k,m}$ , найденные в окрестности  $k=-10$  и  $k=-25$ , они представлены в [12,18],  $d$  и  $e$  – это периоды  $T_{k,m}$  технических устройств, они обнаружены в окрестности  $k=35-40$ , см. [14-16];  $f$  – при  $k=-51$ : здесь располагается центр чувствительности палочек сетчатки глаз человека и птиц [21]

рактерные для УСУП, и переходы между ними. Цель нашей статьи заключается в иллюстрации уникальной ситуации, когда простейший частный эксперимент приводит к результатам, применимым к явлениям, возникающих во всевозможных пространственных и временных масштабах.

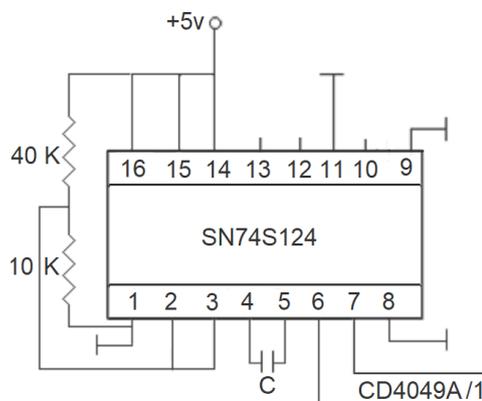
### Метод измерений

Для изучения УСУП мы использовали различные релаксационные генераторы. В настоящее время мы используем RC-генератор периодических колебаний на базе микросхемы K531ГГ1 (или ее прообраза SN74S124), см. рисунок 2.

Импульс, свидетельствующий о приходе фронта меандра электрического сигнала мультивибратора, подавался при измерениях в форме короткого импульса на звуковую карту компьютера. Расстояние между импульсами оцифровывалось написанной в среде МАТЛАБ программой, настроенной на обнаружение этих импульсов, на накопление результатов измерений и на периодическую запись интервалов между импульсами в файл на диск компьютера с указанием в имени файла момента времени этой записи.

Серии измерений повторяли с 10-секундным интервалом. За этот период времени измеряли несколько периодов и выбирали по тому или иному алгоритму средний или наиболее представительный период. При обработке накопленных на диске компьютера файлов многодневных записей применяли программу Excel из пакета MS Office, а также специальные программы на МАТЛАБ.

Генератор (мультивибратор) при этом пита-



**Рис. 2.** Ядро RC-генератора периодических колебаний. Для того, чтобы период генератора попал в окрестность периода 1 сек, емкость  $C$  выбиралась из окрестности 400  $\mu F$ . Сопряжение с компьютером для определения периода колебаний производится посредством звуковой карты с частотой семплинга 44100 Гц

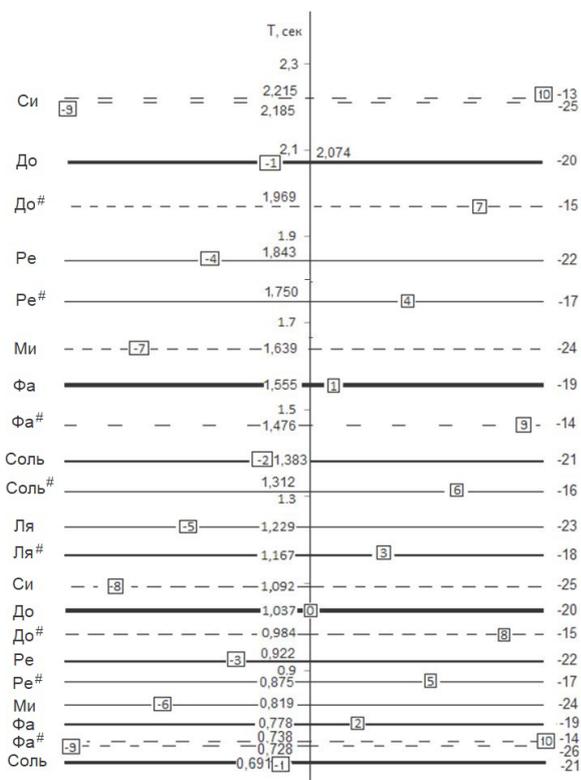
# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

ется через USB-порт компьютера и микроконтроллер Arduino Due. В качестве сканирующего фактора мы можем использовать управляющее напряжение с Arduino или медленно изменяющиеся внешние (температурные) условия, демпфируя их воздействие на период генератора путем установки генератора в изолированном помещении с относительно постоянными параметрами и/или помещением в специальный теплоизолирующий кожух.

## Результаты измерений

Результаты измерений иллюстрируют наличие дискретных значений периодов УСУП и переходов между ними.

На *рисунке 3* изображена т.н. страта УСУП. Ниже приведены *рисунки 4-8*, в какой-то мере да-



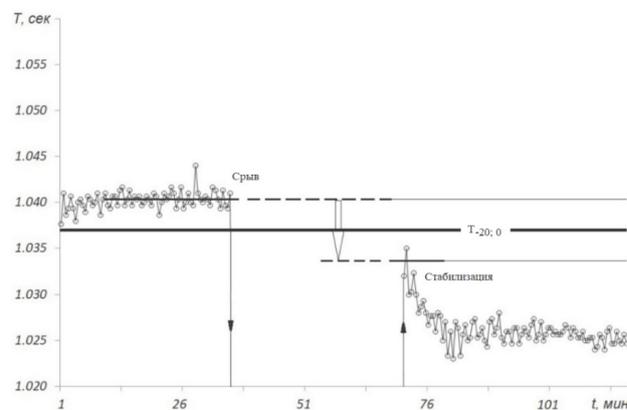
**Рис. 3.** Страта УСУП: серия 19 наиболее выраженных периодов УСУП, попадающих в зону утроения периода в окрестности односекундного периода, (один из 19 периодов страты дублетный: его расщепление составляет пифагорейскую комму). Выбор границ страты не очень существен; например, их удобно поместить в середине дублетов 0,738/0,728 и 2,215/2,185 секунд. Числами в рамках представлены значения параметра  $m$  периодов  $T_{k,m}$ . Эти периоды изображены горизонтальными линиями разной толщины. Толщина линии – это визуальное представление параметра  $m$ : линия тем толще, чем меньше абсолютная величина параметра  $m$ . Параметр  $k$  размещен столбиком справа от уровней. Понятие страты родственно понятию музыкальной октавы пифагорейского строя. В октаве происходит не утроение, а удвоение частоты, и роль 19 периодов страты играют уже 12 нот музыкальной октавы [23, 24]

ющие представление о некоторых проявившихся в экспериментах свойствах уровней УСУП.

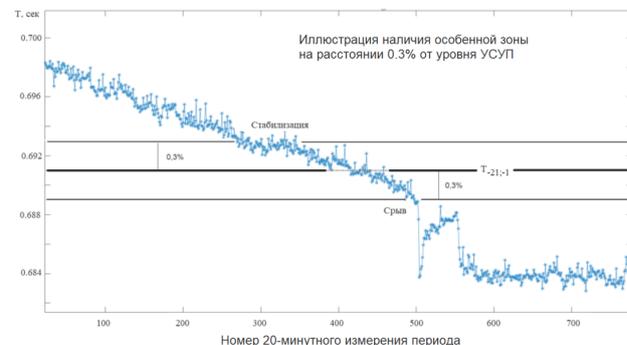
## Обсуждение

Различные значения периодов  $T_{k,m} = T_0 * 3^k / 2^m$  образуют довольно плотное множество периодов, однако все они сильно различаются по интенсивности, и их заметность быстро падает с ростом абсолютного значения параметра  $m$ . Реально мы отслеживаем картину близких периодов в интервале от  $m = -10$  до  $m = +10$  – т.н. страту (*рисунк 3*). Поскольку при изменении периода втрое картина страты повторяется, можно сказать, что УСУП «склеена» из таких страт одинакового вида, лишь численные значения периодов будут отличаться в них втрое, в 9 раз, в 27 и т.д. раз.

*Рисунки 4 и 5* иллюстрируют, что на расстоянии 0.3% от дискретного уровня УСУП могут возникать условия либо для стабилизации периода колебаний генератора, либо наоборот для резкого изменения периода. На *рисунке 4* возникает ситуация длительной стабилизации периода, затем срыва, после чего происходит восстановление, но теперь на расстоянии 0.3%



**Рис. 4.** Особенности на расстоянии 0.3% от уровня УСУП, проявляющиеся как в стабилизации, так и в срыве особо устойчивого периода с  $m=0$  (*рисунок из [25]*)



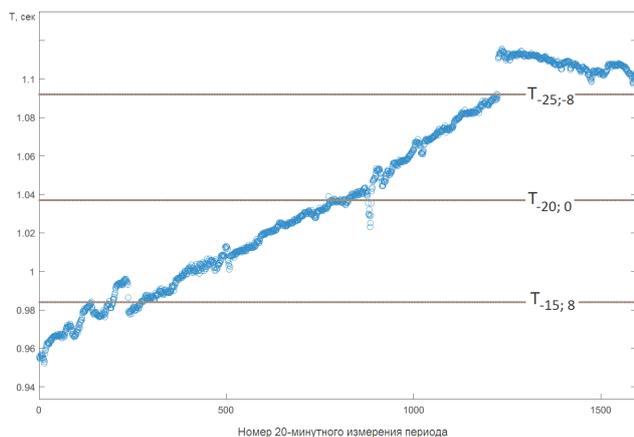
**Рис. 5.** Особенности на расстоянии 0.3% от уровня УСУП, проявляющиеся как в стабилизации, так и в срыве колебаний в окрестности особо устойчивого периода с  $m=-1$

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

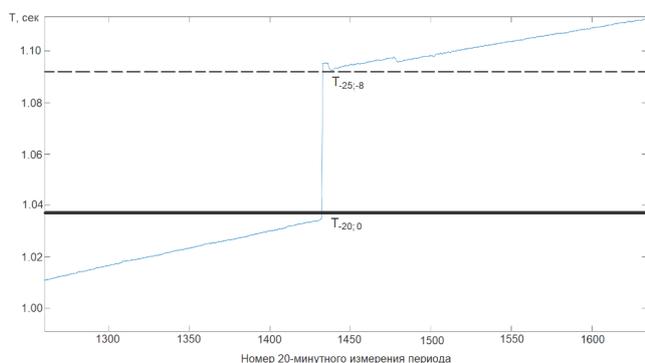
в другом направлении. На *рисунке 5* ситуация близкая, но с другими особенностями. Сначала происходит стабилизация при отклонении 0.3%, затем происходит равномерный дрейф, который завершается на расстоянии -0.3% резким скачком значения периода. Причина особенностей при отклонениях  $\pm 0.3\%$  от периода УСУП сейчас изучается.

*Рисунок 6* показывает, что точная настройка на частоту УСУП может приводить к помехам. Помехи проявились в форме выбросов. Это будет сбивать возникшую настройку на уровень УСУП. Учет этого обстоятельства указывает на техническую возможность подстройки частоты генератора к частоте, лежащей вне зоны выбросов.

*Рисунок 7* показывает возможную причину возникновения этих выбросов, т.е. помех: при



**Рис. 6.** Серия аномальных выбросов в результатах 20-минутных измерений периода в окрестности периодов УСУП  $T_{-15;8}$ ,  $T_{-20;0}$  и  $T_{-25;-8}$ . Моменты возникновения аномалий отчетливо коррелируют с моментами прохождения дрейфующего периода РС-генератора через расчетные значения периода УСУП



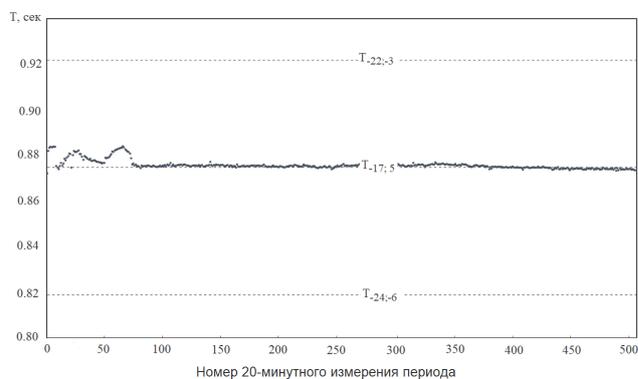
**Рис. 7.** Дискретный переход с высоковероятного уровня  $T_{-20;0}$  на соседний уровень УСУП в опыте с усиленной термостабилизацией генератора. Сканирующее смещение среднего значения периода в этом случае задавалось на генераторе линейным изменением управляющего напряжения, подаваемого с микроконтроллера

приближении частоты генератора к резонансу с частотой УСУП возможны дискретные переходы между дискретными уровнями УСУП. Таким образом, очень точно настроиться на частоту УСУП без специальных ухищрений, по-видимому, сложно и даже, возможно, вообще нельзя: настройка будет сбиваться дискретными переходами, подобным переходу, изображенному на *рисунке 7*.

На *рисунке 8* настройка на частоту УСУП возникла после предварительной долгой тренировки работающего генератора, заключенного в теплоизолирующий кожух. После этого на несколько дней установка была полностью обесточена, компьютер выключен и кожух открыт. Затем все было восстановлено и снова запущено в работу. После приблизительно суточного периода адаптации возник наблюдаемый захват частоты УСУП, продержавшийся до момента выключения установки, шесть суток.

Длительность периода УСУП на *рисунке 8* – это сумма длительностей двух перемежающихся полупериодов, (длинного и короткого полупериодов полного колебания) возникших в использованном генераторе. Оба полупериода и их гармоники не находятся в резонансе с периодом УСУП, который поэтому не подвергается дестабилизирующим искажениям в виде выбросов как на *рисунке 6*.

Пионеры исследования УСУП (Х. Мюллер, С. Петц и др.) уже неоднократно отмечали, что феноменальный диапазон масштабов УСУП обусловлен тем, что естественная шкала для УСУП – логарифмическая. Это феномен особенной природы. Его аналоги – финансовая инфляция, атомный взрыв, взрыв размножения в биологии, вселенская инфляция и т.д. Все они из-за



**Рис. 8.** Захват частоты УСУП после включения экспериментальной установки и последовавшего околосуточного процесса стабилизации режима работы генератора. Каждая точка графика – результат усреднения значений периода за очередные 20 минут работы генератора, горизонтальные штриховые линии – соседние уровни страты УСУП

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

ограниченности ресурсов и из-за возникновения других препятствий продолжаются небольшое число поколений.

Надо отметить, что формула С. Петца не содержит каких-либо переменных за исключением целочисленных, дискретных параметров  $k$  и  $m$ . Оказалось, что формула Петца выполняется при изменении области приложения, по крайней мере, на 30 десятичных порядков. Это было бы удивительно для рядовых явлений, где доминирует не логарифмический, а обычный линейный масштаб времени: физика явлений, масштабы которых различаются на десятки порядков, обычно сильно различаются. Параметр  $T_0$  мог бы даже претендовать на роль мировой константы, если бы он не был определен с точностью до сомножителя 3: значение периода, соответствующее  $k=0$ , было выбрано С. Петцем из соображений удобства, изменение втрое численного значения величины  $T_0$  успешно компенсируется переопределением параметра  $k$  на единицу. Несмотря на эту относительную слабость «потенциальной мировой константы»  $T_0$  и, соответственно, формулы для периодов УСУП, возникает уникальная возможность создания в любом временном масштабе высокостабильных часов. Так, например, из рисунка 8 видно, что за счет введения двух полупериодов, «конвоирующих» период УСУП сверху и снизу, можно опереть стабильность создаваемого устройства на уникальную стабильность периода УСУП.

Возвращаясь к вынужденной гипотезе С. Петца о возможности существования некой гипотетической субэлектронной фрактальной материи, которая могла бы сыграть роль динамической среды для крупномасштабных синхронизирующих волн, вызывающих утраивающиеся периоды циклов в астрономических и геологических процессах, мы формулируем ее в форме другой идеи. Это идея лежащего в фундаменте мироздания т.н. трипликатора – самовоспроизводящегося автомата (автомата фон Неймана), аналога биологического дубликатора, лежащего в фундаменте биосферы Земли [26-30].

### Заключение

Как предполагал С. Петц, определяя константу  $T_0=114,572218767559$  лет со столь большим количеством значащих цифр, «вне-вселенские» периоды универсальной системы утраивающихся периодов замечательно стабильны. Хотя все еще не всегда легко обнаружимые в эксперименте, после преодоления некоторых технических трудностей периоды УСУП могут послужить основой для перспективы создания технических устройств с особо стабильными характеристиками.

### Литература

1. Muller H., Fractal scaling models of resonant oscillations in chain systems of harmonic oscillators. Progress in physics. (2009) iss. 2. Pp.72-76.
2. Аршинов В.И., Буданов В.Г. / В сб. Самоорганизация и наука: опыт философского осмысления. Арго, ИФ РАН, 1994. 349с.
3. Буданов В.Г. Синергетика ритмокаскадов в эволюционирующих системах. Труды юбилейной сессии РАЕН «Леонардо да Винчи XX века. К 100-летию А.А. Чижевского». 27-28 февраля 1997. Москва. С.34-35.
4. Куликович А.Е. В кн. Вернадскианская революция в системе научного мировоззрения – поиск ноосферной модели будущего человечества в XXI веке. Коллективная монография под науч. ред. Субетто А.И. СПб.: Астерион, 2003. 352с.
5. Буданов В.Г. Самоорганизация времени: эволюция партитуры / В сб. Синергетика времени. Под ред. Аршинова В.И. М.; 2007. С.46-72.
6. Puetz S.J. «The Unified Cycle Theory: How Cycles Dominate the Structure of the Universe and Influence Life on Earth» (2009) Outskirts Press, Denver, Colorado.
7. Puetz S.J. Unified Cycle Theory: Introduction & Data. (2010) Proceedings of the NPA, Long Beach 2010 Annual Conference.
8. Puetz S.J., Prokoph A., Borchardt G., Mason E.W. Evidence of synchronous, decadal to billion-year cycles in geological, genetic, and astronomical events. Chaos, Solitons & Fractals, 2014. 62-63. Pp.55-75.
9. Puetz S. J., Borchardt G. Quasi-periodic fractal patterns in geomagnetic reversals, geological activity, and astronomical events. Chaos Solitons & Fractals 81, 246-270 (2015).
10. Puetz S.J. Prokoph A., Borchardt G. Evaluating alternatives to the Milankovitch theory. Journal of Statistical Planning and Inference. 170, March 2016. Pp.158-165.
11. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Бондарь А.Т. Проявление универсальной системы утраивающихся периодов в многосуточных биоритмах // Известия Института инженерной физики, 2020. №2 (56). С.33-38.
12. Бондарь А.Т., Федоров М.В., Коломбет В.А. Утраивающиеся периоды в мультимасштабных физических и биологических явлениях // Биофизика, 2015. №60(6). С.1208.
13. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В., Федоров М.В. Обнаружение в технических устройствах фрактальной системы утраивающихся периодов, известной по своим физическим, геофизическим, биофизическим и биологическим манифестациям // Биофизика, 2016. №61(3). С.615.
14. Коломбет В.А., Коломбет Е.В., Лесных В.Н.

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

О перспективе применения фундаментальной системы утраивающихся периодов в мультимасштабных технических устройствах // Известия Института инженерной физики, 2016. №1(39). С.8-11.

15. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В. Предсказание тактовой частоты процессора будущего поколения компьютеров как пример эффективности использования в технике свойств фрактальной системы утраивающихся периодов // Известия Института инженерной физики, 2016. №2(40). С.55-58.

16. Коломбет В.А. Лесных В.Н., Коломбет Е.В. Особенность проявления фрактальной системы утраивающихся периодов в телевидении и мобильной телефонии // Известия Института инженерной физики, 2016. №4(42). С. 20-24.

17. Коломбет В.А. Обнаружение частот Петца в когнитивных процессах // Материалы всероссийской конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях». 25-29 сентября 2017 г., Нижний Новгород, ИПФ. С.126-128.

18. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Скавуляк А.Н., Коломбет Е.В., А.Т. Бондарь. Проявление универсальной системы утраивающихся периодов в УВЧ-терапии // Известия Института инженерной физики, 2017. №2(44). С.70-73.

19. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В. Учет существования сети Петца как новый путь к повышению эффективности распознавания целей // Известия Института инженерной физики, 2017. №3(45). С.37-39.

20. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В. Определение перспективных частот РАС // Известия Института инженерной физики, 2017. №4(46). С.18-21.

21. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В. Соответствие сумеречного зрения человека универсальной системе утраивающихся периодов // Известия Института инженерной физики, 2020. №1(55). С.11-15.

22. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Тео-

рия колебаний. М.: Наука, 1981. 918 с.

23. Коломбет В.А., Елистратов А.В., Лесных В.Н. О предпочтительных универсальных настройках мультирезонансных устройств // Известия Института инженерной физики, 2021. №2(60). С.59-63.

24. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В. Универсальная система утраивающихся периодов и музыкальный строй // Известия Института инженерной физики, 2018. №3(49). С. 88-90.

25. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Елистратов А.В., Коломбет Е.В., Федоров М.В., Шноль С.Э., Экспериментальный подход к исследованию универсальной системы утраивающихся периодов / Биофизика, 2019. № 64 (2). С.396.

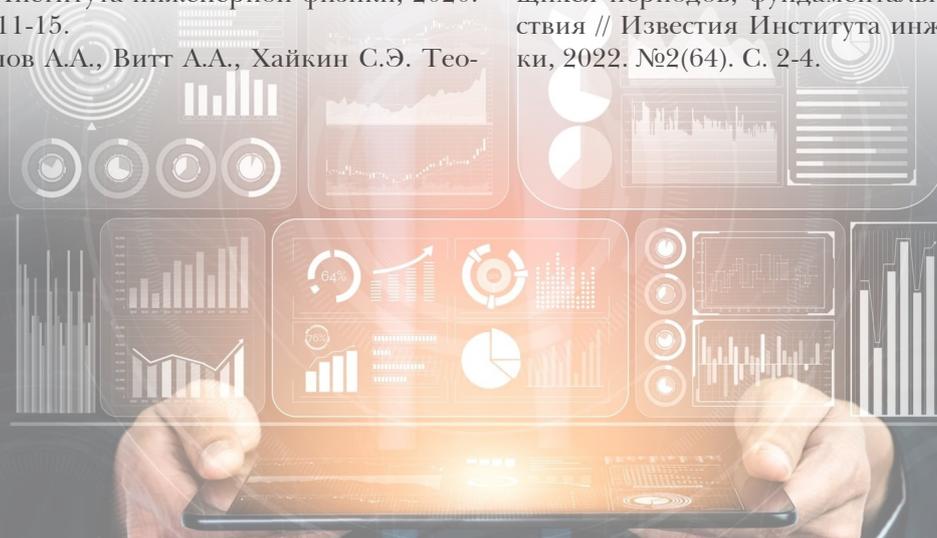
26. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Бондарь А.Т. Треугольник Серпинского как удобная математическая модель для описания универсальной системы утраивающихся периодов // Известия Института инженерной физики, 2018. №1(47). С.63-68.

27. Коломбет В.А., Архипов В. Ю., Елистратов А.В., Лесных В.Н., Коломбет Е.В., Серая О.Ю. Стохастика и мутации в универсальной системе утраивающихся периодов // Известия Института инженерной физики, 2018. №2(48). С. 56-62.

28. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В. Новые перспективы приложений универсальной системы утраивающихся периодов // Известия Института инженерной физики, 2018. №4(50). С. 62-66.

29. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Елистратов А.В. Трипликатор как механизм формирования универсальной системы утраивающихся периодов // Известия Института инженерной физики, 2020. №4(58). С. 5-10.

30. Коломбет В.А., Панчелюга В.А., Лесных В.Н. Самовоспроизводящиеся автоматы во вселенной: жизнь, универсальная система утраивающихся периодов, фундаментальные взаимодействия // Известия Института инженерной физики, 2022. №2(64). С. 2-4.



# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 004.021

## МАЛОИМПУЛЬСНОЕ ИНИЦИИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНОГО ТИПА ДЛЯ БОРТОВОЙ АВТОМАТИКИ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

## LOW-PULSE SAFETY-TYPE INITIATING DEVICE FOR ON-BOARD AUTOMATICS OF ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY

**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: sv\_s\_iif@mail.ru

**Андрей Евгеньевич Салько**  
*доктор технических наук, профессор*  
заместитель генерального директора  
по научно-технической политике и  
межструктурным коммуникациям  
АНО «Институт инженерной физики»  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7 (985) 923-42-09

**Владимир Ильич Загарских**  
*кандидат технических наук, доцент*  
старший научный сотрудник  
ВА РВСН имени Петра Великого  
Адрес: 143900, Московская обл.,  
г. Балашиха, ул. Карбышева, д. 8  
Тел.: 8 (903) 254-68-56  
E-mail: zagarskih@rambler.ru

**Евгений Николаевич Кузин**  
*кандидат технических наук,*  
*старший научный сотрудник*  
старший научный сотрудник  
ВА РВСН имени Петра Великого  
Адрес: 143900, Московская обл.,  
г. Балашиха, ул. Карбышева, д. 8  
Тел.: 8 (916) 105-48-25  
E-mail: varvsn@mil.ru

### Аннотация

В статье представлены краткие сведения о задачах, решаемых предохранительными и пусковыми устройствами на борту современных изделий ракетно-космической техники, проведен анализ схем построения устройств подобного принципа действия, их преимуществ и недостатков. Приведена схема перспективного иницирующего устройства предохранительного типа с улучшенными характеристиками.

**Ключевые слова:** предохранительное и пусковое устройство, предохранительно-исполнительный механизм, надежность, простота конструкции, электродетонатор, трансляторы и размножители детонационных команд.

### Summary

The article presents brief information about the tasks solved by safety and starting devices on board modern products of rocket and space technology, analyzes the schemes for constructing devices of a similar principle of operation, their advantages and disadvantages. A diagram of a promising safety-type initiating device with improved characteristics is given.

**Keywords:** safety and starting device, safety-actuating mechanism, reliability, simplicity of design, electric detonator, translators and multipliers of detonation commands.

Развитие отечественной ракетно-космической техники в последние десятилетия идет в направлении решения все более усложняющихся задач, связанных как с освоением космического пространства в мирных целях, так и с разработкой новейших образцов оборонной техники. Создаются современные более эффективные баллистические ракеты дальнего действия (БРДД) и ракетно-космические комплексы

(РКК). Одним из наиболее динамически развивающихся направлений является создание автоматических космических аппаратов (КА), предназначенных как для проведения уникальных фундаментальных научных исследований, так и для выполнения социальных, экономических и прикладных задач.

Для всех современных БРДД и особенно РКК и КА характерно отделение пассивных

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

элементов конструкции, т.е. элементов, исчерпавших свой энергетический ресурс. К таковым относятся ступени, разгонные блоки, двигательные установки систем обеспечения запуска и т.д. Кроме того, отделению подлежат хвостовые и переходные отсеки, головные обтекатели, крышки люков научной аппаратуры, теплозащитные оболочки спускаемых аппаратов и т.д., функционирование которых завершено. Эти важные задачи в изделиях ракетно-космической техники (РКТ) в большей части выполняют различные пиротехнические и пиромеханические системы. В их состав входят такие устройства разделения, как разрывные болты, детонационные замки, пиротехнические замки-толкатели, детонирующие удлиненные заряды кумулятивного и не кумулятивного типов, пиротехнические и детонационные ножи, чеки, фиксаторы и т.д. Исторически эти системы незаслуженно названные вспомогательными [1], а некоторые и сопутствующими [2].

Кроме перечисленных выше задач, устройства и системы разделения с детонирующим и с горящим снаряжением осуществляют в процессе полета космических аппаратов приведение в рабочее положение выносных приборов и развертывание в космосе трансформируемых конструкций, таких как панели солнечных батарей, фермы телескопов, зеркала, антенны, надувные тормозные устройства. Количество таких устройств на борту современных ракет и КА может быть более двух-трех сотен. Абсолютное большинство из них срабатывает от инициирующих устройств электрического типа (электродетонаторов, пиропатронов, электровоспламенителей) непосредственно либо, за-

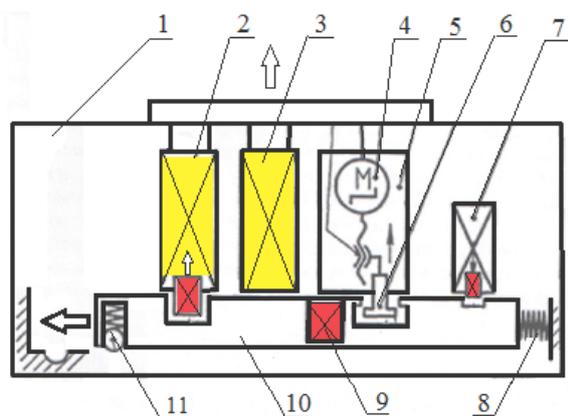
действуется через раздатчики детонационных и огневых команд, в качестве которых применяются специальные трансляторы, размножители детонационных или огневых команд, в строго определенной последовательности. Эта последовательность задается циклограммой от программно-временных устройств бортовых систем управления (СУ). Срабатывание устройств может осуществляться и «в ручном режиме» с Земли. Для исключения возможности преждевременного самопроизвольного срабатывания пироприборов от случайных электрических импульсов электростатических блуждающих токов, грозовых разрядов либо от несанкционированного вмешательства извне на борту КА применяются предохранительные и пусковые устройства (ППУ), объединяющие в себе функции инициирующего устройства (инициатора) и предохранителя [1].

Разработанные для ракетной и космической техники ППУ по принципу действия и конструктивным особенностям были подобны устройствам для взрывателей артиллерийских снарядов и ракет, так называемым предохранительно-исполнительным механизмам (ПИМ) [3].

Принципиальные схемы построения предохранительно-исполнительных механизмов ракет, в наибольшей степени удовлетворяющих требованиям, предъявляемым к ППУ РКТ, представлены на *рисунках 1 и 2*. Особенностью устройства ПИМ с электромеханическим приводом [4] (*рисунок 1*) является то, что для повышения надежности и безопасности в состав его конструкции входят три стопора: пиротехнический (2), термический (6) и электромеханический (5). Последний приводится в действие шаговым электродвигателем (4), на валу которого имеется устройство, преобразующее вращательное движение в поступательное перемещение элемента зацепления (6) с заслонкой (10), локализирующей передаточный заряд (9) от детонатора (3). В свою очередь, после освобождения от зацепа заслонка перемещается под действием витой пружины (8) и стопорится шариковым замком (11).

Такое устройство имеет ряд недостатков, поскольку наличие пружин, шагового электродвигателя и нескольких механизмов предохранения существенно ухудшают массово-габаритные характеристики изделия, требуют дополнительного электропотребления от бортовой системы электроснабжения, что ограничивает его применение, прежде всего, в космических аппаратах, долгое время пребывающих в условиях ближнего и дальнего космоса.

Предохранительно-исполнительный механизм, представленный на *рисунке 2*, является



**Рис. 1.** Схема предохранительно-исполнительного механизма взрывателей с электромеханическим стопором: 1 – корпус; 2 – пиротехнический механизм предохранения; 3 – электродетонатор; 4 – шаговый двигатель; 5 – электромеханический стопор; 6 – зацеп; 7 – термомеханический стопор; 8 – пружина; 9 – передаточный заряд; 10 – заслонка; 11 – шариковый замок

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

более совершенным [6]. Он имеет ряд неоспоримых преимуществ по сравнению с ПИМ, представленным выше. Во-первых, в его конструкции отсутствуют пружины, которые могут потерять свою жесткость в течение длительного времени хранения, а подвижный элемент – движок (1) перемещается под действием газов, образующихся при сгорании вышибного пиротехнического заряда (5). Во-вторых, движок снабжен фиксатором (10), выполненным в форме конусной чашки. При перемещении движка фиксатор упирается в расточку канала, деформируется и жестко стопорит движок во взведенном положении.

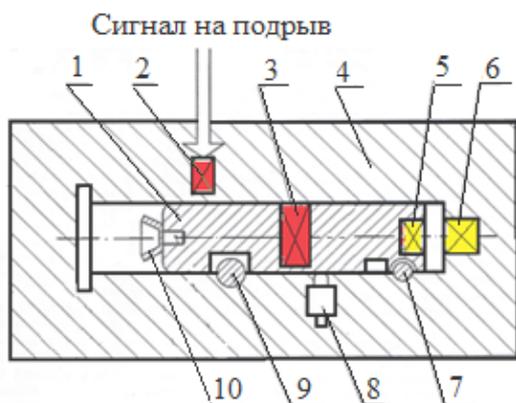
Такое устройство ПИМ в определенной мере отвечает требованиям по надежности, простоте конструкции и приемлемым массо-габаритным характеристикам. В тоже время и эта конструкция не лишена ряда существенных недостатков. При интенсивном сгорании вышибного заряда, ударе фиксатора по торцевой части канала и последующей его деформации в устройстве возникают значительные ударно-волновые нагрузки, что недопустимо для бортовой аппаратуры РКТ. В качестве вышибного заряда применяется шашка из пиротехнического состава (ПТС). Известно [7], что баллистические характеристики ПТС зависят от внешних факторов – давления и температуры окружающей среды. Изменение этих факторов ведет к тому, что скорость газовой выделению, а, следовательно, и давление на движок, создаваемое продуктами сгорания ПТС, будут различным. Это неизбежно скажется на времени срабатывания ПИМ и показателя надежности в различных условиях применения. Сюда следует отнести и наличие в устройстве различных типов средств иницииро-

вания – электродетонатора (2) и электровоспламенителя (6), которые имеют значительные различия по времени срабатывания и его разбросу.

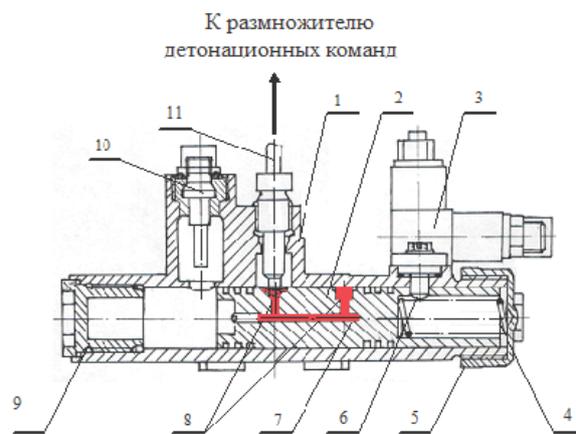
Авторами [5] разработано и запатентовано ППУ под названием «устройство защиты детонационных цепей». Устройство, в сравнении с рассмотренными ранее, отличается высокой надежностью и быстродействием. Принципиальная схема устройства представлена на рисунке 3.

В общем, принцип работы устройства аналогичен работе ПИМов, представленной выше. Перемещение подвижного элемента (поршня) (2) осуществляется также как и в ПИМ с электромеханическим стопором под действием пружины (4) после срабатывания фиксатора (6) детонационной чеки (3). Особенностью устройства является то, что в устройстве отсутствуют пиротехнические заряды. Высокая надежность и быстродействие обеспечиваются применением элементов с детонирующим снаряжением, на характеристики которых не сказывается влияние внешних факторов [7]. Эти показатели были подтверждены при использовании устройства на борту разгонного блока «Фрегат».

Однако в настоящее время и эта конструкция ППУ не может в полной мере удовлетворять предъявляемым требованиям. Прежде всего, по сложности конструкции, низкой технологичности и высокой стоимости изделия. Нежелательно и наличие в конструкции пружины, предназначенной для перевода движка из режима предохранения в рабочее положение, а также двух электродетонирующих устройств. Кроме того, не исключены возможность поворота поршня вокруг оси под действием внешних нагрузок, что частично, либо полностью исключит переда-



**Рис. 2.** Схема предохранительно-исполнительного механизма взрывателей с механическим стопором: 1 – движок; 2 – электродетонатор; 3 – передаточный заряд; 4 – корпус; 5 – вышибной заряд; 6 – пусковой электровоспламенитель; 7, 9 – стопор; 8 – микровыключатель цепи подключения электродетонатора; 10 – фиксатор перемещения движка



**Рис. 3.** Схема устройства защиты детонационных цепей: 1 – корпус; 2 – поршень; 3 – чека детонации; 4 – пружина; 5 – крышка; 6 – фиксатор; 7 – передаточный заряд-транслятор; 8 – концевой усилительный заряд; 9 – заглушка; 10 – электродетонатор; 11 – заряд-транслятор детонационных команд

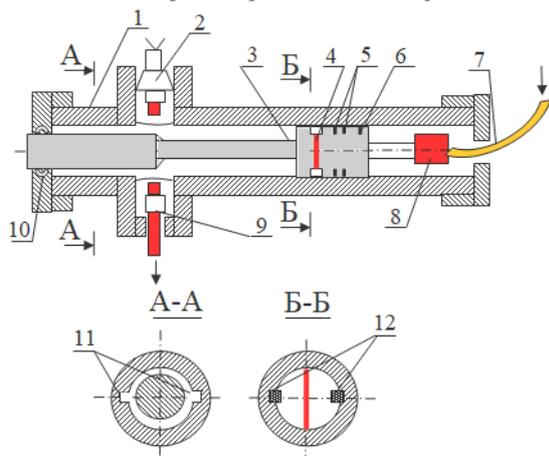
## ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

чу детонационного импульса от электродетонатора (10) к заряду-транслятору (11).

По результатам анализа конструктивных особенностей построения предохранительных и пусковых устройств предложена новая конструкция изделия, в которой в качестве вышибного заряда использован заряд-усилитель транслятора детонационных команд, а в качестве фиксатора – шариковый замок [8]. Дополнительно устройство снабжено двумя диаметрально расположенными во внутренней полости корпуса продольными пазы (канавками) и двумя выступами на цилиндрической поверхности движка. Заряд-усилитель и транслятор содержат не более 0,5 г ВВ, что обеспечивает надежное срабатывание предлагаемого устройства и низкий уровень величины ударного импульса на элементы конструкции и чувствительную аппаратуру. Кроме того, применение детонирующего, а не твердотопливного или пиротехнического вышибного заряда, существенно повышает надежность работы устройства. В свою очередь, уменьшение массы вышибного заряда позволяет снизить массовые и габаритные характеристики ППУ.

Схематично конструкция предлагаемого устройства представлена на *рисунке 4*.

Принцип работы устройства состоит в следующем. По сигналу от бортовой системы управления космического аппарата срабатывает транслятор (7) детонационных команд с зарядом-усилителем №1 (8). В результате чего в «запоршневом» объеме создается давление, под действием которого срезается штифт (6), а дви-



**Рис. 4.** Принципиальная схема инициирующего устройства предохранительного типа: 1 – корпус; 2 – электродетонатор; 3 – движок; 4 – передаточный заряд; 5 – уплотнительные кольца; 6 – срезающийся штифт; 7 – транслятор детонационных команд; 8 – заряд-усилитель №1 транслятора детонационных команд; 9 – концевой элемент ДУЗ либо заряд-усилитель №2; 10 – шариковый замок; 11 – направляющие пазы; 12 – выступы

жок (3) перемещаться влево и все элементы основной детонационной цепи выстраиваются в линию в порядке, обеспечивающем работоспособность устройства.

Принципиально приведение в действие предохранительного механизма аналогично работе баллистической катапульты взрывного типа (срабатывает от удлиненного заряда взрывчатого вещества, частично размещенного в зарядной камере). Методика расчета таких устройств достаточно подробно описана в [7] и в данной статье не приводится.

### Литература

1. Вспомогательные системы ракетно-космической техники / Под ред. проф. И.В. Тишунина. М.: Мир, 1970. 400 с.
2. Расчет и проектирование систем разделения ступеней ракет: Учеб. пособие / К.С. Колесников, В.В. Кокушкин, С.В. Борзых, Н.В. Панкова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 376 с.
3. Средства поражения и боеприпасы: Учебник / А.В. Бабкин, В.А. Велданов, Е.Ф. Грязнов и др.; Под общ. ред. В.В. Селиванова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 984 с.
4. Патент РФ №2400701 С2, МПК F42С 15/40. Предохранительно-исполнительный механизм взрывателя / Дьяков С.Б., Ильин В.Э., Коротков И.И. и др. – Патентообладатель ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ». №2008145277/02; заявл. 17.11.2008; опубл. 27.09.2010.
5. Патент РФ 2541595 С1, МПК F42С 15/00, F42С 15/184, F42С 15/40, F42С 15/42. Устройство защиты детонационных цепей бортовой автоматики летательных аппаратов / Ефанов В.В., Кузин Е.Н., Горюнов В.В. – Патентообладатель ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина». - №2013147419/11, заявл. 24.10.2013; опубл. 20.02.2015.
6. Патент РФ №2255302 С1, МПК F42С 15/184. Предохранительно-исполнительный механизм взрывателя / Егоренков Л.С., Сулин Г.А., Платонов Н.А. и др. – Патентообладатель ФГУП «НИИ «Поиск». №2004104450/02, заявл. 17.02.2004; опубл. 27.06.2005.
7. Загарских В.И., Кузин Е.Н., Гладышев А.И. Детонационные устройства изделий ракетно-космической техники: Монография. М.: ВА РВСН им. Петра Великого, 2018. 173 с.
8. Патент РФ №2760863 С1, МПК F42С 15/40. Инициатор предохранительного типа для детонационных систем отделения космических аппаратов / Кузин Е.Н., Загарских В.И., Макаров Г.И., Булавский А.С. – Патентообладатель ФГКВОУ ВО «Военная академия РВСН им. Петра Великого». №2021103333/03, заявл. 11.02.2021; опубл. 01.12.2021.

УДК 621.398.8

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ РАДИОКАНАЛА С КОДОВЫМ УПЛОТНЕНИЕМ ДАННЫХ И РАСШИРЕНИЕМ СПЕКТРА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНОЙ ПРЕРЫВИСТОЙ ПОМЕХИ

## A METHOD FOR ASSESSING THE NOISE IMMUNITY OF A RADIO CHANNEL WITH CODE COMPACTION OF DATA AND SPECTRUM EXPANSION UNDER THE INFLUENCE OF PULSED INTERMITTENT INTERFERENCE

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

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

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

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

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

### Аннотация

В статье представлена методика оценки помехоустойчивости радиоканала с кодовым уплотнением данных с расширенным спектром сигнала. Установлена степень влияния параметров кодового уплотнения данных, расширения спектра сигнала, импульсной помехи на помехоустойчивость радиоканала.

**Ключевые слова:** кодовое уплотнение данных, псевдослучайная последовательность, ортогональная последовательность, коэффициент расширения спектра сигнала, вероятность битовой ошибки, битовое отношение сигнал/шум.

### Summary

The article presents a technique for assessing the noise immunity of a radio channel with code multiplexing of data with a spread spectrum signal. The degree of influence of the parameters of code compression of data, the expansion of the signal spectrum, impulse noise on the noise immunity of the radio channel is established.

**Keywords:** data code multiplexing, pseudo-random sequence, orthogonal sequence, signal spreading factor, bit error probability, bit signal-to-noise ratio.

В [1] опубликованы результаты оценки помехоустойчивости цифровых систем передачи информации (СПИ) с кодовым уплотнением данных при воздействии стационарных помех.

Установлено, что кодовое уплотнение данных совместно с расширением спектра сигнала (скремблирование сигнала по закону псевдослучайной последовательности – ПСП) позволяет решать ряд важных задач:

- повысить помехоустойчивость СПИ;
- реализовать тактовую самосинхронизацию принимаемого сигнала;
- сузить требуемую полосу пропускания канала передачи данных.

Исследуем влияние импульсной прерывистой помехи на такую СПИ, так как оптимальная импульсная помеха при достаточной мощности может свести на нет преимущества кодо-

вого уплотнения данных [2].

Обобщенная структурная схема исследуемого радиоканала с кодовым уплотнением данных и расширением спектра сигнала представлена на *рисунке 1* (передающий тракт) и *рисунке 2* (приемный тракт).

Входные данные в последовательном коде поступают на вход скремблера и далее на вход регистра сдвига ( $RG_1$ ), который на своем выходе формирует  $n$ -разрядный параллельный двоичный код. Блок кодового уплотнения данных (БКУ), на вторые входы которого поступает  $n$  ортогональных двоичных последовательностей Уолша-Адамара от генератора  $G_{Wal(t)}$ , формирует многоуровневый (число уровней равно  $n+1$ ) групповой сигнал, ширина частотного спектра которого равна ширине спектра исходного потока данных [1].

Информационный модулятор (УМ) реализует угловую модуляцию гармонического сигнала, формируемого генератором  $G$ , а расширяющий модулятор (РМ) осуществляет вторую ступень манипуляции сигнала (фазовой манипуляции) по закону ГПСП<sub>2</sub>. Для управления работой  $RG_1$ , генератора  $G_{Wal(t)}$ , генераторов ПСП установлен генератор тактовых импульсов (ГТИ) [1]. Оконечные каскады (ОК) передатчика формируют выходной сигнал заданной мощности и частоты

для излучения передающей антенной  $WA_1$ .

Следует выделить два возможных способа формирования излучаемого сигнала:

- длина ортогональных последовательностей Уолша-Адамара  $n$  равна длине псевдослучайной последовательности  $B$ , т.е.,  $n=B$  и в этом случае коэффициент расширения спектра излучаемого сигнала  $K_S$  равен

$$K_S = \frac{B}{n} = 1;$$

- длина  $n < B$  и в этом случае  $K_S = \frac{B}{n} > 1$ .

На приемной стороне взаимодействующие блоки поиска и обнаружения сигнала (БПОС), блок слежения за фазой сигнала (БСФ) и блок слежения за задержкой (БСЗ) ПСП выделяют несущую группового сигнала, которая поступает на вход углового демодулятора (ДМ) [1]. Выделенный групповой сигнал с выхода ДМ поступает на первые входы  $n$  корреляционных декодеров (КД), на вторые входы которых поступают ортогональные последовательности Уолша-Адамара  $Wal_i^{(n)}(t)$  в полярном коде. Выходные двоичные символы КД в параллельном коде поступают на информационные входы регистра сдвига  $RG_2$ , который под действием тактовых импульсов, поступающих с выхода БСЗ, преобразуется в последовательный код, а скремблер, состоящий из сумматора по модулю 2 и ГПСП<sub>3</sub>,

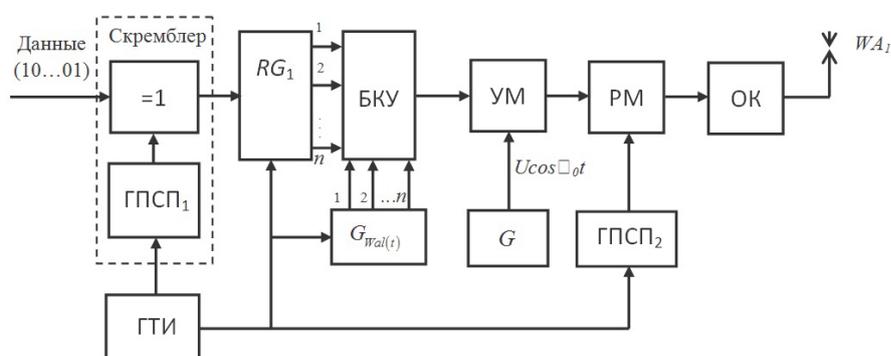


Рис. 1. Структурная схема передающего тракта

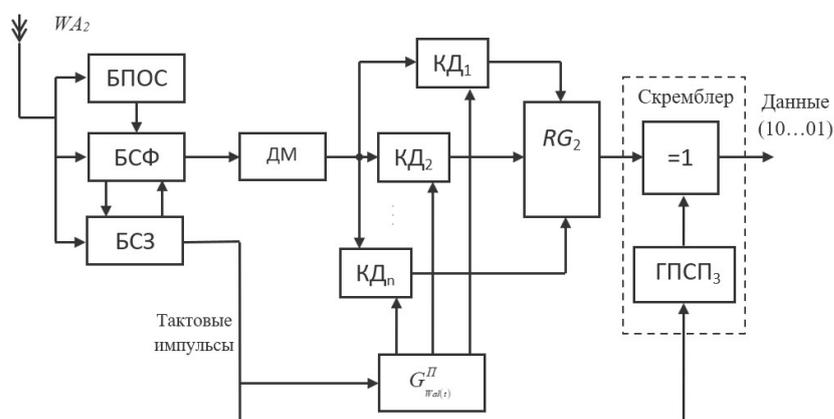


Рис. 2. Структурная схема приемного тракта

восстанавливает последовательность принятых двоичных символов данных.

Спектральная плотность мощности (энергия) импульсной помехи равна

$$N_{\text{инп}} = \frac{P_{\text{инп}}}{\Delta F_s \rho},$$

где  $P_{\text{инп}}$  – мощность помехи;

$\rho$  – скважность прерывистой импульсной помехи, равная отношению ширины частотного спектра помехи  $\Delta F_j$  к полосе спектра сигнала  $\Delta F_s$ .

Очевидно, если скважность  $\rho=1$ , то влияние импульсной помехи будет соответствовать влиянию аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ). Тогда вероятность битовой ошибки на выходе одного корреляционного декодера (КД) будет равна

$$P_b = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \rho \int_{\left(\frac{1}{nh_b^2}\right)^{-0.5}}^{\infty} e^{-t^2} dt,$$

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

Учитывая, что в составе декодера группового сигнала содержится  $n$  корреляционных декодеров (КД), а также, что спектральная плотность  $N_0$  мощности АБГШ и  $N_{\text{инп}}$  соотносятся как  $N_{\text{инп}} \gg N_0$ , то выражение для битовой ошибки декодирования (помехоустойчивости) радиоканала будет иметь вид

$$P_b \approx 0,5 \left[ 1 - \left[ 1 - 1,1286 \rho \int_{\left(\frac{1}{nh_b^2 + \frac{P_{\text{инп}}}{P_s \rho B}}\right)^{-0.5}}^{\infty} e^{-t^2} dt \right]^n \right],$$

где  $\frac{P_{\text{инп}}}{P_s}$  – отношение мощности импульсной помехи и полезного сигнала.

При  $n=1$  (поэлементный прием),  $P_{\text{инп}}/P_s=0$  изменение вероятности  $P_b$  в зависимости от  $h_b^2$  представлено в таблице 1.

Анализ результатов, представленных в таблице 1, подтверждает их совпадение с известными [2].

В таблице 2 представлены зависимости  $P_b=f(h_b^2, n)$  при  $P_{\text{инп}}/P_s=0$ .

Сравнение результатов оценки  $P_b$ , представленных в таблицах 1 и 2, показывает:

- увеличение значений  $n$  позволяет получить фиксированное (одинаковое) значение вероятности  $P_b$  при меньших битовых отношениях  $h_b^2$  (например, при  $n=1$  значение  $P_b=10^{-3}$  получено при  $h_b^2=4,7534$ , при  $n=8$  значение  $P_b=10^{-3}$  получено при  $h_b^2=0,8337$ , а при  $n=16$  значение  $P_b=10^{-3}$  получено при  $h_b^2=0,457$ ;

- сигнальное отношение сигнал/шум, равное  $h_s^2=n h_b^2$ , увеличивается с ростом  $n$  и для  $P_b=10^{-3}$  при  $n=8$  значение  $h_s^2=8 \times 0,8337=6,67$ , а при  $n=16$  значение  $h_s^2=16 \times 0,457=7,312$ , что объясняет выигрыш по помехоустойчивости (вероятности  $P_b$ ) при реализации приема сигнала в целом на корреляционных декодерах.

Оценим влияние значений  $n$  и  $B$  на помехоустойчивость (вероятность  $P_b$ ) при воздействии импульсной помехи. В таблице 3 представлены оценки  $P_b=f(h_b^2)$  в зависимости от значений  $n, B, \rho, P_{\text{инп}}/P_s$ .

**Таблица 1**

Зависимость  $P_b=f(h_b^2)$  при  $n=1$

$h_b^2$	0,8166	2,698	4,7534	6,761	6,9	9,04	11,27	13,49
$P_b$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$1,18 \cdot 10^{-4}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$

**Таблица 2**

Зависимости  $P_b=f(h_b^2, n)$  при  $P_{\text{инп}}/P_s=0$

$h_b^2$ при $n=8$	0,302	0,57	0,8337	1,107	1,585	3,319
$P_b$ при $n=8$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$1,91 \cdot 10^{-6}$	$1,27 \cdot 10^{-12}$
$h_b^2$ при $n=16$	0,189	0,3236	0,457	0,731	0,8543	3,32
$P_b$ при $n=16$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-5}$	$1,586 \cdot 10^{-6}$	$\approx 10^{-18}$

**Таблица 3**

Оценки  $P_b=f(h_b^2)$  для различных  $n, B, \rho, P_{\text{инп}}/P_s$

$n=B=8; \rho=0,15;$ $K_s=1; P_{\text{инп}}/P_s=1$	$h_b^2$	0,1746	1	10,713	78,323
	$P_b$	$10^{-1}$	$3,175 \cdot 10^{-2}$	$1,79 \cdot 10^{-2}$	$1,67 \cdot 10^{-2}$
$n=8; B=16; \rho=0,15;$ $K_s=2; P_{\text{инп}}/P_s=1$	$h_b^2$	0,134	0,8791	7,076	28,623
	$P_b$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$1,86 \cdot 10^{-2}$	$1,245 \cdot 10^{-3}$
$n=16; B=64; \rho=0,7;$ $K_s=4; P_{\text{инп}}/P_s=5$	$h_b^2$	0,7145	1,7298	3,3124	10,138
	$P_b$	$10^{-3}$	$1,74 \cdot 10^{-5}$	$1,28 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-8}$

## РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

Анализ результатов, представленных в *таблице 3*, показывает:

- при наличии импульсной помехи ( $P_{\text{инп}}/P_s \geq 1$ ) увеличение  $h_b^2$  не позволяет получить требуемых значений вероятности  $P_b$  (например, при  $n=B=8$  с увеличением  $h_b^2 > 10,713$  вероятность  $P_b$  практически не уменьшается);

- расширение спектра сигнала ( $K_s \geq 2$ ) приводит к уменьшению вероятности  $P_b$  (например, при  $n=16, B=64, K_s=4, h_b^2=10,138$  значение  $P_b=7 \cdot 10^{-8}$  даже при  $P_{\text{инп}}/P_s=5$ );

- изменение параметра  $\rho$  (скважности импульсной помехи) влияет на значение  $P_b$  при других равных условиях.

Оценим влияние скважности  $\rho$  на вероятность  $P_b$  при различных значениях  $n, B, P_{\text{инп}}/P_s$  и  $h_b^2$  (*таблица 4*).

Анализ результатов, представленных в *таблице 4*, позволяет сделать важные выводы:

- существует оптимальное значение  $\rho = \rho_{\text{опт}}$  скважности импульсной помехи, при котором помеха наносит наибольший ущерб системе передачи данных;

- оптимальное значение  $\rho$  зависит от  $h_b^2, P_{\text{инп}}/P_s, n$  и  $B$  (например, при  $h_b^2=0,8669, K_s=2, P_{\text{инп}}/P_s=1$  значение  $\rho_{\text{опт}}=0,0295$ ; при  $h_b^2=0,5, K_s=2, P_{\text{инп}}/P_s=5$  значение  $\rho_{\text{опт}}=0,0708$ );

- знание оптимального значения  $\rho_{\text{опт}}$  позволяет определить максимальное значение  $P_b$  для выбора параметров корректирующего кода, с целью достижения заданной достоверности принятых данных в системе радиосвязи;

- кодовое уплотнение данных позволяет уменьшить требуемое значение базы сигнала с расширенным спектром для обеспечения заданной помехоустойчивости в  $B/n$  раз.

### Заключение

1. Представленная методика оценки помехоустойчивости, в отличие от известных, учитывает параметры кодового уплотнения данных, сигнала с расширенным спектром и позволяет определить степень их влияния на вероятность битовой ошибки при известных энергетических соотношениях сигнала и помех.

2. Установлено, что при фиксированных па-

**Таблица 4**  
Влияние скважности  $\rho$  на вероятность  $P_b$

$n=B=8;$ $h_b^2=0,8669;$ $K_s=1; P_{\text{инп}}/P_s=1$	$\rho$	$2,57 \cdot 10^{-5}$	$2,723 \cdot 10^{-4}$	0,059	0,302	0,5	1
	$P_b$	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$4,473 \cdot 10^{-2}$	$2,02 \cdot 10^{-2}$	$1,27 \cdot 10^{-2}$	$7,42 \cdot 10^{-3}$
$n=8; B=16;$ $h_b^2=0,8669;$ $K_s=2; P_{\text{инп}}/P_s=1$	$P$	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$4,17 \cdot 10^{-3}$	0,0295	0,302	0,5	1
	$P_b$	$10^{-4}$	$10^{-2}$	$2,2824 \cdot 10^{-2}$	$5,396 \cdot 10^{-3}$	$3,717 \cdot 10^{-3}$	$2,93 \cdot 10^{-3}$
$n=8; B=512;$ $h_b^2=0,8669;$ $K_s=64;$ $P_{\text{инп}}/P_s=1$	$P$	$3,13 \cdot 10^{-5}$	$9,23 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-3}$	0,302	0,603	1
	$P_b$	$10^{-4}$	$7,725 \cdot 10^{-4}$	$3,04 \cdot 10^{-4}$	$2,78 \cdot 10^{-4}$	$5,12 \cdot 10^{-4}$	$8,23 \cdot 10^{-4}$
$n=B=16;$ $h_b^2=0,8669;$ $K_s=1; P_{\text{инп}}/P_s=1$	$P$	$1,29 \cdot 10^{-5}$	$1,72 \cdot 10^{-3}$	0,028184	0,37154	0,413	1
	$P_b$	$10^{-4}$	$10^{-2}$	$4,18 \cdot 10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$8,695 \cdot 10^{-5}$
$n=16; B=32;$ $h_b^2=0,5;$ $K_s=2; P_{\text{инп}}/P_s=5$	$\rho$	$1,29 \cdot 10^{-5}$	$1,32 \cdot 10^{-4}$	$1,496 \cdot 10^{-3}$	0,0708	0,302	1
	$P_b$	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	0,10293	$5,152 \cdot 10^{-2}$	$1,345 \cdot 10^{-2}$

раметрах кодового уплотнения данных, заданных отношениях мощности импульсной помехи и полезного сигнала, битовых отношениях сигнал/шум существует оптимальное значение скважности импульсной помехи, при котором импульсная помеха наносит наибольший ущерб системе передачи данных (наибольшая вероятность битовой ошибки).

3. При воздействии импульсной помехи невозможно обеспечить требуемую помехоустойчивость радиоканала увеличением битового отношения сигнал/шум.

4. Применение кодового уплотнения данных и расширения спектра сигнала эффективный способ повышения помехоустойчивости радиоканала, подверженного влиянию импульсной

прерывистой помехи, так как коэффициент расширения спектра сигнала уменьшается в  $V/n$  раз.

### Литература

1. Зеленевский В.В., Зеленевский Ю.В., Черноусов М.С., Зеленевский А.В. Метод оценки помехоустойчивости цифровых систем передачи с кодовым уплотнением данных при воздействии стационарных помех // Известия Института инженерной физики, 2020. №4. С.31-36.
2. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е., Шестапов В.И. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра прямой модуляцией псевдослучайной последовательностью. Под ред. В.И. Борисова. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: РадиоСофт, 2011. 550 с.

## ЛИНЕЙНЫЕ СТОХАСТИЧЕСКИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫЕ КОДЫ В СТИРАЮЩЕМ КАНАЛЕ СВЯЗИ LINEAR STOCHASTIC NOISE-RESISTANT CODES IN THE ERASING COMMUNICATION CHANNEL

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 предложен класс линейных стохастических помехоустойчивых кодов, использующих двойное стохастическое преобразование, обеспечивающее хорошие характеристики случайности символов кода. Декодирование кода выполняется с исправлением стираний за пределами минимального кодового расстояния и сводится к решению системы линейных уравнений относительно значений стираний. При линейной независимости столбцов проверочной матрицы кода, соответствующих стертым символам, значения стираний определяются однозначно, а иначе выполняется списочное декодирование стираний. В списке стираний выбираются значения стираний, обеспечивающие наибольшую величину суммарной достоверности значений стираний. Приведены оценки вероятности ошибки в биномиальном канале связи. Показано, что декодирование линейных стохастических двоичных кодов имеет полиномиальную сложность от блоковой длины кода с показателем степени не выше 3. Рассмотрен пример декодирования линейного стохастического двоичного кода ST(15,7) с коррекцией 7-ми стираний.

**Ключевые слова:** стохастические помехоустойчивые коды, декодирование с исправлением стираний, списочное декодирование стираний, достоверность значений стираний.

### Summary

The article proposes a class of linear stochastic noise-resistant codes using a double stochastic transformation that provides good randomness characteristics of code symbols. The decoding of the code is performed with the correction of erasures beyond the minimum code distance and is reduced to solving a system of linear equations with respect to the values of erasures. With linear independence of the columns of the verification matrix of the code corresponding to the erased characters, the values of erasures are determined unambiguously, otherwise the list decoding of erasures is performed. In the list of erasures, the erasure values are selected that provide the greatest amount of the total validity of the erasure values. Estimates of the probability of error in the binary communication channel are given. It is shown that the decoding of linear stochastic binary codes has a polynomial complexity from the block length of the code with an exponent not higher than 3. An example of decoding a linear stochastic binary code ST(15,7) with correction of 7 erasures is considered.

**Keywords:** stochastic noise-resistant codes, decoding with correction of erasures, list decoding of erasures, reliability of erasure values.

### Введение

Стохастические или случайные коды являются кодами с высокой помехоустойчивостью, но сложным алгоритмом декодирования. К. Шеннон доказал, что использование случайного кодирования в канале с помехами при скорости передачи меньше пропускной способности канала, позволяет достичь сколь угодно малой вероятности ошибки при увеличении длины кода [1]. Стохастические коды достигают границы Шеннона, однако, возрастание сложности декодиро-

вания по экспоненциальному закону от длины кода делает невозможным их практическое применение. Декодирование стохастических кодов с длиной блока больше 20-30 по правилу максимального правдоподобия возможно только с применением переборных алгоритмов и вычислительно нереализуемо [2]. На приемной стороне наименее достоверные символы кода могут стираться. Тогда декодирование помехоустойчивых кодов выполняют с исправлением стираний. При исправлении стираний одновременно

исправляют ошибки, которые попали на место стираний. Декодирование с исправлением стираний существенно проще, чем декодирование с исправлением ошибок, а по помехоустойчивости не хуже, чем декодирование с исправлением ошибок, а во многих случаях, лучше, поскольку число исправляемых стираний примерно вдвое больше, чем число исправляемых ошибок. При этом возможно не слишком сложное декодирование стираний за пределами минимального кодового расстояния, и доля таких стираний довольно значительна [3]. Однако эффективное декодирование с исправлением стираний возможно только в стирающем канале связи, в котором имеются признаки достоверности символов, обеспечивающие надежное стирание ошибочных символов кода [4]. Ведь даже небольшое число ошибок, остающихся после стирания недостоверных символов, при декодировании с исправлением стираний приводит к ошибочному декодированию помехоустойчивого кода. В стирающем канале вероятность стирания символа с ошибкой должна быть как можно ближе к 1.

В настоящей статье предложены линейные стохастические коды с исправлением стираний. Описаны алгоритмы кодирования и декодирования. Кодирование выполняется с использованием двойного стохастического преобразования, обеспечивающего хорошие характеристики случайности символов [5]. Декодирование линейных кодов с исправлением стираний сводится к решению системы линейных уравнений относительно значений стертых символов. Система линейных уравнений имеет единственное решение при условии линейной независимости столбцов проверочной матрицы кода, соответствующих позициям стертых символов. При линейной зависимости столбцов выполняется списочное декодирование кода [6]. В списке решений можно выбрать наиболее правдоподобное решение, используя признаки достоверности символов кода. Асимптотически параметры линейных стохастических кодов стремятся к наилучшим известным значениям [7]. Линейные стохастические коды обеспечивают высокую частотную и энергетическую эффективность и могут успешно применяться в различных системах связи.

### 1. Кодирование линейных стохастических кодов

Случайность символов кода обеспечивается двойным стохастическим преобразованием исходной информации [8]. Пусть источник генерирует информационные символы кода

$$a_0, a_1, \dots, a_{k-1} \in GF(p^m).$$

Первое стохастическое преобразование состоит в наложении на исходную информационную часть кода псевдослучайной последовательности

$$b_i = a_i \oplus \gamma_i, \quad B = \{b_i\}, \quad i = 0..k-1,$$

где  $\gamma_i \in GF(p^m)$  – псевдослучайные символы, генерируемые датчиком случайных чисел.

Полученная псевдослучайная последовательность подвергается второму стохастическому преобразованию, заключающемуся в умножении последовательности на псевдослучайную порождающую матрицу кода размера  $k \times n$ . Кодирование помехоустойчивого кода

$$C = B \times G.$$

Элементы порождающей матрицы  $G = \{g_{ij}\}$ ,  $g_{ij} \in GF(p^m)$  генерируются датчиком случайных чисел. Строки порождающей матрицы являются случайными последовательностями. Генерируемые случайные последовательности  $\gamma_i$  и  $g_{ij}$  являются нелинейными случайными последовательностями, поэтому и стохастический код, формируемый при случайном выборе строк порождающей матрицы, и последующем их суммировании, также является нелинейной случайной последовательностью. С другой стороны проверочные символы кода получаются как линейная комбинация информационных символов. Стохастический код является линейным помехоустойчивым кодом и одновременно – нелинейной случайной последовательностью. При случайных информационных символах кода, принимающих значения 0 или 1 с вероятностью 0,5, проверочные символы будут принимать те же значения с вероятностью 0,5, то есть также будут случайными. Поскольку проверочные соотношения кода различаются, между собой не менее, чем на 1 случайный символ, то значения символов кода являются независимыми величинами.

Для линейной независимости строк порождающей матрицы может потребоваться несколько попыток генерации каждой строки. Пусть сгенерировано  $f$  линейно независимых строк, тогда вероятность того, что  $f+1$  псевдослучайные строки будут линейно независимы при  $m$ -кратной попытке генерации  $(f+1)$ -ой строки

$$P_m = 1 - \left( \frac{1}{2^{n-f}} \right)^m.$$

Число попыток генерации строки убывает по экспоненциальному закону и требуется небольшое число попыток, чтобы с большой вероятностью получить линейно независимые строки. Так, при  $n=15$ ,  $f=7$ , для  $m=1$  получим  $P_m=0,9961$ , а для  $m=2$  –  $P_m=0,999985$  и так да-

лее. Псевдослучайную порождающую матрицу можно вычислить заранее, до кодирования стохастического кода, и ее генерация не влияет на сложность кодирования.

Сложность кодирования стохастического кода определяется сложностью наложения псевдослучайной последовательности и умножения на порождающую матрицу и имеет порядок  $S_k = O(n^2)$ .

Линейный стохастический код  $C = \{c_i\}$ ,  $i = 0 \dots n-1$  при не слишком большой скорости кода и достаточно большой блоковой длине  $n$  будет иметь минимальное кодовое расстояние, оцениваемое величиной  $d = 0,5 n$  [9].

## 2. Декодирование линейных стохастических кодов

На входе декодера будут приняты символы кода  $F = f_0 f_1 \dots f_{n-1}$  из поля  $GF(p^m)$  с оценками достоверности  $A = \alpha_0 \alpha_1 \dots \alpha_{n-1}$ ,  $0 \leq \alpha_i \leq 1$ . Символы кода стираются при достоверности меньше порогового значения  $\alpha_i < \alpha_p$ ,  $i = 0 \dots n-1$  [10]. Код  $F$  отличается от переданного кода  $C$  на вектор ошибок  $E$

$$F = C \oplus E.$$

Синдром ошибок до введения стираний

$$S = F \times H^T, \quad (1)$$

где  $H$  – проверочная матрица кода.

Пусть неизвестные значения стертых символов  $X = x_1, x_2, \dots, x_s$ . Обозначим  $F_1$  – код, полученный из  $F$ , если значения всех стертых символов принять равными 0, а

$F_2 = F - F_1 = 0, \dots, x_1, 0, \dots, x_2, 0, \dots, x_s, 0, \dots$  – код, полученный из  $F$ , если значения всех нестертых символов равны 0.

Вычислим

$$S_1 = F_1 \times H^T, \quad (2)$$

вычитая из (1) уравнение (2)

$$(F - F_1) \times H^T = S - S_1.$$

Система линейных уравнений относительно значений стертых символов

$$F_2 \times H^T = S_2, \quad (3)$$

где  $S_2 = S - S_1$ .

Система уравнений (3) запишется

$$\begin{aligned} h_{1j_1} x_1 + h_{1j_2} x_2 + \dots + h_{1j_s} x_s &= s_1 \\ h_{2j_1} x_1 + h_{2j_2} x_2 + \dots + h_{2j_s} x_s &= s_2 \\ &\dots \end{aligned} \quad (4)$$

$$h_{n-kj_1} x_1 + h_{n-kj_2} x_2 + \dots + h_{n-kj_s} x_s = s_{n-k}$$

где  $\{h_{kj}\}$  – столбцы проверочной матрицы, соответствующие стираниям символов.

Значения стертых символов получают при решении системы линейных уравнений (4) над полем Галуа  $GF(p^m)$ . Система имеет единствен-

ное решение, если ранг матрицы системы  $r$  равен числу неизвестных ( $r=s$ ). Решения можно находить методом исключения неизвестных Гаусса, приводя матрицу системы при помощи элементарных преобразований к трапециевидной форме [11]. Однако удобнее использовать метод Жордана ортогонализации матрицы системы, являющейся модификацией метода Гаусса, в котором не требуется выполнять обратный ход [12].

Совместная система имеет конечное множество решений, если в трапециевидной форме матрицы системы будет меньше, чем  $s$  строк, отличных от 0. Ранг матрицы системы будет меньше числа неизвестных ( $r < s$ ), при этом некоторым  $s-r$  неизвестным можно придавать произвольные значения. Тогда оставшиеся  $r$  неизвестных определяются единственным образом. Условие совместности системы уравнений определяется теоремой Кронекера-Капелли о равенстве рангов матриц основной и расширенной системы уравнений [13].

Конечное множество решений соответствует списочному декодированию кода. При назначении  $s-r$  неизвестным произвольных значений список решений будет содержать  $q^{s-r}$  значений стираний. В этом списке решений целесообразно выбирать значения стираний, обеспечивающие наибольшую суммарную достоверность стертых символов. Каждое из  $q$  значений стертых символов имеет свою достоверность, зависящую от расстояния до правильного значения символа. Суммарная достоверность зависит от набора значений стертых символов.

Сложность декодирования определяется сложностью решения системы линейных уравнений и при использовании метода Гаусса-Жордана оценивается величиной  $S_d = O(n^3)$ .

При стирании всех ошибочных символов оставшиеся безошибочные символы позволяют декодировать кодовое слово, если позициям стертых символов соответствуют линейно независимые столбцы проверочной матрицы кода. При минимальном кодовом расстоянии  $d$  любые  $d-1$  столбцов проверочной матрицы линейно независимы и, значит, любые  $d-1$  стираний исправляются. В пределах минимального кодового расстояния исправляются все стирания.

Долю исправляемых стираний за пределами минимального кодового расстояния для двоичного кода можно вычислить, используя оценку случайного кодирования. Некоторые  $s$  случайных столбцов проверочной матрицы будут линейно независимы, если  $s-1$  столбцов линейно независимы и все  $2^{s-1}$  линейных комбинаций этих столбцов проверочной не равны последне-

му  $s$  столбцу. Число различных комбинаций случайного столбца равно  $2^{n-k}$ . Обозначим  $P_s$  – вероятность исправления  $s$  стираний, тогда

$$P_s = P_{s-1} - \frac{1}{2^{n-k-s+1}}, \quad (5)$$

где начальное условие  $P_d = 1 - \frac{1}{2^{n-k-d+1}}$ . (6)

Для больших  $n$  при увеличении числа стираний на единицу доля неисправимых стираний увеличивается примерно вдвое.

Более точная оценка учитывает весовую структуру кода. При  $s=d\dots n-k$  стираниях число линейно независимых столбцов равно разности между общим числом комбинаций из  $s$  столбцов проверочной матрицы и числом комбинаций из  $s$  линейно зависимых столбцов. Любая комбинация из  $s$  линейно зависимых столбцов проверочной матрицы может быть получена добавлением  $j$  столбцов к набору из  $s-j$  столбцов с нулевой суммой, соответствующей кодовому слову. Число способов выбора указанных  $j$  столбцов равно числу сочетаний из  $n-s+j$  по  $j$ . Поэтому, для кода со спектром  $A_0, A_1, \dots, A_n$  нижняя оценка доли линейно независимых столбцов [14,15]

$$P_s \geq \frac{\tilde{N}_n^s - \sum_{j=0}^{s-d} A_{s-j} C_{n-s+j}^j}{C_n^s}, \quad s = d\dots n-k. \quad (7)$$

Для линейных стохастических кодов ST(15,7,5) и ST(31,16,7), имеющих соответственные спектры

$$W_{15} = (1,0,0,0,0,18,30,15,15,30,18,0,0,0,0,1) \text{ и}$$

$$W_{31} = (1,0,0,0,0,0,155,465,0,0,5208,8680,0,0,18259,9,18259,0,0,8680,5208,0,0,465,155,0,0,0,0,0,1),$$

оценка доли линейно независимых столбцов проверочной матрицы (доли исправимых стираний) в зависимости от числа стираний  $s$  приведена в таблице 1.

Видно, что хотя доля исправляемых стираний

**Таблица 1**

ST(15,7,5)		ST(31,16,7)	
$s$	$P_s$	$s$	$P_s$
5	0,9964	7	0,9999
6	0,9702	8	0,9998
7	0,8597	9	0,9989
8	0,5061	10	0,9955
		11	0,9852
		12	0,9577
		13	0,8909
		14	0,7369
		15	0,3925

убывает с увеличением  $s$ , однако, остается довольно высокой [16]. В предельном случае код может корректировать даже стирания веса  $n-k$ .

При исправлении стираний в пределах минимального кодового расстояния (число стираний не больше  $d-1$ ) вероятность правильного приема кода в канале с независимыми стираниями

$$P_1 = \sum_{i=0}^{d-1} C_n^i p^i (1-p)^{n-i}, \quad (8)$$

где  $p$  – вероятность стирания.

С учетом стираний за пределами минимального кодового расстояния вероятность приема кода

$$P_2 = \sum_{i=0}^{d-1} C_n^i p^i (1-p)^{n-i} + \sum_{i=d}^s P(i) C_n^i p^i (1-p)^{n-i}, \quad s = d\dots n-k, \quad (9)$$

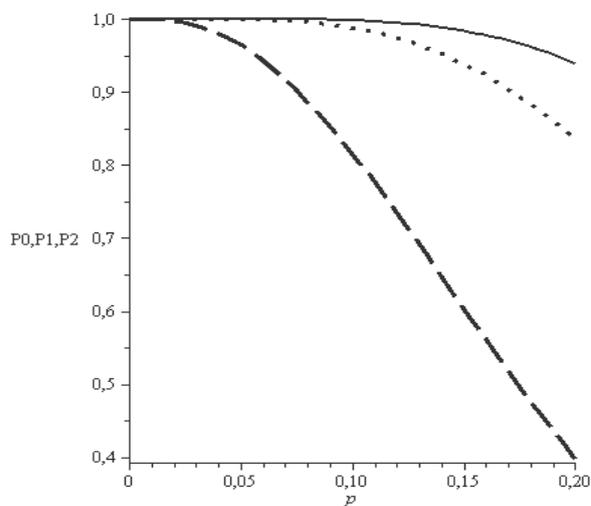
где  $P(i)$  – доля исправляемых стираний из таблицы 1.

На рисунке 1 показаны зависимости вероятности правильного приема кода ST(15,7,5) от вероятности ошибок или стираний в канале связи при декодировании в пределах минимального кодового расстояния с исправлением ошибок P0(---) и стираний P1(...), либо за пределами минимального кодового расстояния с исправлением стираний P2(—).

Декодирование с исправлением стираний за пределами минимального кодового расстояния обеспечивает значительное увеличение вероятности правильного приема по сравнению с исправлением ошибок или стираний в пределах минимального кодового расстояния.

### 3. Пример декодирования линейного стохастического кода

Рассмотрим двоичный стохастический код с блоковой длиной 15 и информационной длиной 7, стирания веса 4 и менее гарантированно исправляются, доля исправляемых стираний



**Рис. 1.** Вероятности правильного декодирования кода ST(15,7,5)

веса 5 примерно равна 0,9964, веса 6 – 0,9702, 7 – 0,8597, 8 – 0,5061. Псевдослучайные порождающая и проверочная матрицы этого кода запишутся

$$G = \begin{pmatrix} 001010100101100 \\ 101000111111011 \\ 000110111110011 \\ 100101000011101 \\ 011001010000111 \\ 001011000010101 \\ 010100101100001 \end{pmatrix},$$

$$H = \begin{pmatrix} 110001001101011 \\ 101011110001001 \\ 100110101111000 \\ 100011000110001 \\ 100100010110100 \\ 001010010100101 \\ 111100100111000 \\ 100010011010111 \end{pmatrix}.$$

Пусть передавался стохастический код  $B = 100110101111000$ , а принят код  $A = 1a_{13}0a_{11}a_{10}0a_8011a_41a_20a_0$ , где  $a_i$  обозначены стирания на  $i = 13, 11, 10, 8, 4, 2, 0$  позициях кода. Всего 7 стираний.

Выполним ортогонализацию проверочной матрицы относительно позиций стертых символов по методу Гаусса-Жордана и выпишем контрольные проверки для восстановления стираний

$$H = \begin{pmatrix} 111001010100000 \\ 000101011101010 \\ 100011011100000 \\ 000000110100010 \\ 000000011010000 \\ 100001010001110 \\ 001000011001011 \end{pmatrix}$$

Отсюда значения стертых символов

$$\begin{cases} a_0 = a_{12} + a_7 + a_6 + a_3 + a_1 = 0 \\ a_2 = a_{14} + a_9 + a_7 + a_3 + a_1 = 0 \\ a_4 = a_7 + a_6 = 1 \\ a_8 = a_7 + a_5 + a_1 = 1 \\ a_{10} = a_{14} + a_9 + a_7 + a_6 + a_5 = 1 \\ a_{11} = a_9 + a_7 + a_6 + a_5 + a_3 + a_1 = 1 \\ a_{13} = a_{14} + a_{12} + a_9 + a_7 + a_5 = 0 \end{cases},$$

что совпадает с исходным стохастическим кодом.

Таким образом, удалось исправить 7 стира-

ний символов стохастического кода (15,7), что на 3 стирания больше, чем число исправляемых стираний в пределах минимального кодового расстояния.

### Заключение

Декодирование линейного стохастического помехоустойчивого кода с исправлением стираний является универсальным, его можно применять для произвольного кода, заданного случайной порождающей матрицей. Формирование стохастического кода на основе двойного стохастического преобразования позволяет строить линейные помехоустойчивые коды, являющиеся нелинейными случайными последовательностями. Для эффективного применения предлагаемого алгоритма декодирования требуется высокая надежность оценок достоверности принятых символов кода, которая позволяет стирать все ошибочные символы кода. Декодирование с исправлением стираний обеспечивает высокую помехоустойчивость, соизмеримую с помехоустойчивостью мягкого декодирования. Применение алгоритма декодирования с исправлением стираний позволяет использовать довольно длинные линейные стохастические коды, обладающие высокой помехоустойчивостью.

### Литература

1. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике / К. Шеннон. М.: Изд. «ИЛ», 1963. 830 с.
2. Прилуцкий С.О., Иванов М.А. Стохастические методы защиты памяти // Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова. Серия: Научная сессия, посвященная дню Радио. Выпуск LX-2. М., 2005. С.345-348.
3. Квашенников В.В. Построение системы ортогональных проверок для исправления стираний за пределами минимального кодового расстояния // Известия Института инженерной физики, 2022. №1(63). С.43-47.
4. Гладких А.А. Основы теории мягкого декодирования избыточных кодов в стирающем канале связи. Ульяновск: УЛГТУ, 2010. 379 с.
5. Коржик В.И., Осмоловский С.А., Финк Л.М. Универсальное стохастическое кодирование в системах с решающей обратной связью // Проблемы передачи информации, 1974. Т.10. Вып.4. С.25-29.
6. Guruswami V. Better binary list decodable codes via multilevel concatenation / V. Guruswami, Atri Rudra // IEEE Transactions On Information Theory, 2009. January. Vol. 55. No.1.

7. Осмоловский С.А. Построение и характеристики стохастических кодов, исправляющих ошибки // Вопросы радиоэлектроники. Серия общетехническая, 1980 (1981). Вып.13/2. С.136-146.
8. Осмоловский С.А. О возможности защитить информацию от всех видов воздействий в рамках одного алгоритма // Труды IV Международного научного семинара. Информационные сети, системы и технологии. Москва, 16–19 сентября 2003 г.
9. Torleiv Klove. University of Bergen, Norway. Series on Coding Theory and Cryptology. Codes for Error Detecting. Ch. 2. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 2007.
10. Квашенников В.В. Способ декодирования линейных помехоустойчивых кодов с исправлением стираний. Патент на изобретение РФ №2746797. Приор. 21.04.2021.
11. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. 4-е изд. М.: Наука, 1988.
12. Деммель Дж. Вычислительная линейная алгебра. Теория и приложения. М.: Мир, 2001.
13. Хорн Р., Джонсон Ч. Матричный анализ. М.: Мир, 1989.
14. Попов О.В. Об оценке способности линейных кодов исправлять стирания и обнаруживать ошибки при наличии стираний //Электросвязь, 1967. №10.
15. Афанасьев В.Б., Давыдов А.А., Зигангиров Д.К. Оценка доли стираний, исправляемых линейными кодами //Информационные процессы, 2016. Т.16. №4. С.382-404.
16. Попов О.В. Об исправлении стираний циклическими кодами. В сб. Передача цифровой информации по каналам с памятью. М.: Наука, 1970. С.11-24.

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.021

## МЕТОД ГЕНЕРАЦИИ ПЕРЕСТАНОВКИ БИТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАССИВА УПРАВЛЯЮЩИХ ПЕРЕМЕННЫХ

## BIT PERMUTATION GENERATION METHOD USING ARRAY OF CONTROL VARIABLES

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: sv\_s\_iif@mail.ru

### Аннотация

Рассмотрен один из подходов к построению алгоритма для битовой перестановки, которая может быть использована в качестве криптографического примитива при построении сложных криптосистем. Идея разработки алгоритма построена на неопределенности, задаваемой вектором инициализирующих данных, которые выступают в роли массива управляющих переменных или ключа для формирования новой последовательности порядковых номеров бит. Сам алгоритм не является секретом, а результат перестановки сильно зависит от ключа, который определяет новый порядок следования бит.

**Ключевые слова:** перестановка, элементы, биты, управляющие переменные, ключ, функция, порядок, нумерация.

### Summary

One of the approaches to the construction of an algorithm for bit permutation, which can be used as a cryptographic primitive in the construction of complex cryptosystems, is considered. The idea of developing the algorithm is based on the uncertainty specified by the vector of initializing data, which act as an array of control variables or a key to form a new sequence of ordinal numbers of bits. The algorithm itself is not a secret, and the result of the permutation is highly dependent on the key, which determines the new bit order.

**Keywords:** permutation, elements, bits, control variables, key, function, order, numbering.

Перестановка является часто используемым криптографическим примитивом<sup>1</sup> при построении сложных криптосистем. Для того чтобы получить какую-либо перестановку элементов необходимо их линейно упорядочить, т.е. по некоторому правилу указать какой элемент первый, какой второй и т.д.

Существуют разные виды перестановок [1, 2]: простые перестановки, перестановки со сжатием, с расширением, с повторением, случайные перестановки и т.д. В качестве методов перестановки используют различные приемы: транспозиция элементов (обмен местами двух элементов), перемешивание (рекурсия), сдвиг элементов, бит-реверсивное чередование, лексиграфическое упорядочивание [3] и др.

В данном разделе рассматривается метод генерации разовой перестановки бит с использо-

ванием массива управляющих переменных.

В связи с тем, что элементы битовой последовательности могут быть пронумерованы числами натурального ряда  $(0, 1, 2, \dots, n)$ , любая перестановка бит будет эквивалентна перестановке номеров этих бит, т.е. перестановке чисел натурального ряда.

Особенностью перестановки бит является то, что все переставляемые биты могут являться попарно не различимыми в отличие от их порядковых номеров, представленных числами натурального ряда, которые всегда попарно будут различимы. Отсюда следует, что число различных перестановок в формате бит, будет меньше, чем число различных перестановок их порядковых номеров. Так, если для  $n$  чисел натурального ряда число  $P_n$  перестановок будет равно

$P_n = n!$ , например, для  $n=32$ ,  $P_n = 2,63 \cdot 10^{35}$ , то для  $n$  битовой последовательности всего

<sup>1</sup> Криптографические примитивы – низкоуровневые криптографические алгоритмы, которые часто используются для построения криптографических протоколов. В узком смысле это операции и процедуры, определяющие требуемые свойства криптосистемы.

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

$$P_n = \frac{n!}{n_1! n_2!},$$

например, для  $n=32, n_1=16, n_0=16,$   
 $P_n=601\ 080\ 390;$

для  $n=32, n_1=14, n_0=18,$   
 $P_n=471\ 435\ 600;$

для  $n=32, n_1=10, n_0=22,$   
 $P_n=64\ 512\ 240,$

где  $n_1$  – число бит в последовательности, имеющих значение «1»;

$n_0$  – число бит в последовательности, имеющих значение «0».

В данном случае рассматривается перестановка  $n$  бит, новые порядковые номера для которых вычисляются путем специальных преобразований, проводимых над другой битовой последовательностью длиной в  $m$  бит (при этом

$m$  может быть как больше или равно  $n$ , так меньше  $n$ ). Эта последовательность выступает в роли массива управляющих переменных или, проще говоря, в роли ключа для запуска алгоритма генерации перестановки.

В качестве такого ключа выступает число, представленное в десятичной системе исчисления, которое в последующем переводится в двоичный формат длиной  $m$  бит.

Рассматриваемый криптопримитив представлен  $F_n(X_{n,2})_k$  функцией генерации единичной перестановки бит, где  $X_{n,2}$  –  $n$  разрядное двоичное число.

Функция  $F_n(X_{n,2})_k$  реализует алгоритм преобразования исходной последовательности номеров бит некоего числа  $X_{n,2}$  в новую их последовательность по схеме, представленной на рисунке 1.

Алгоритм генерации перестановки рассмо-

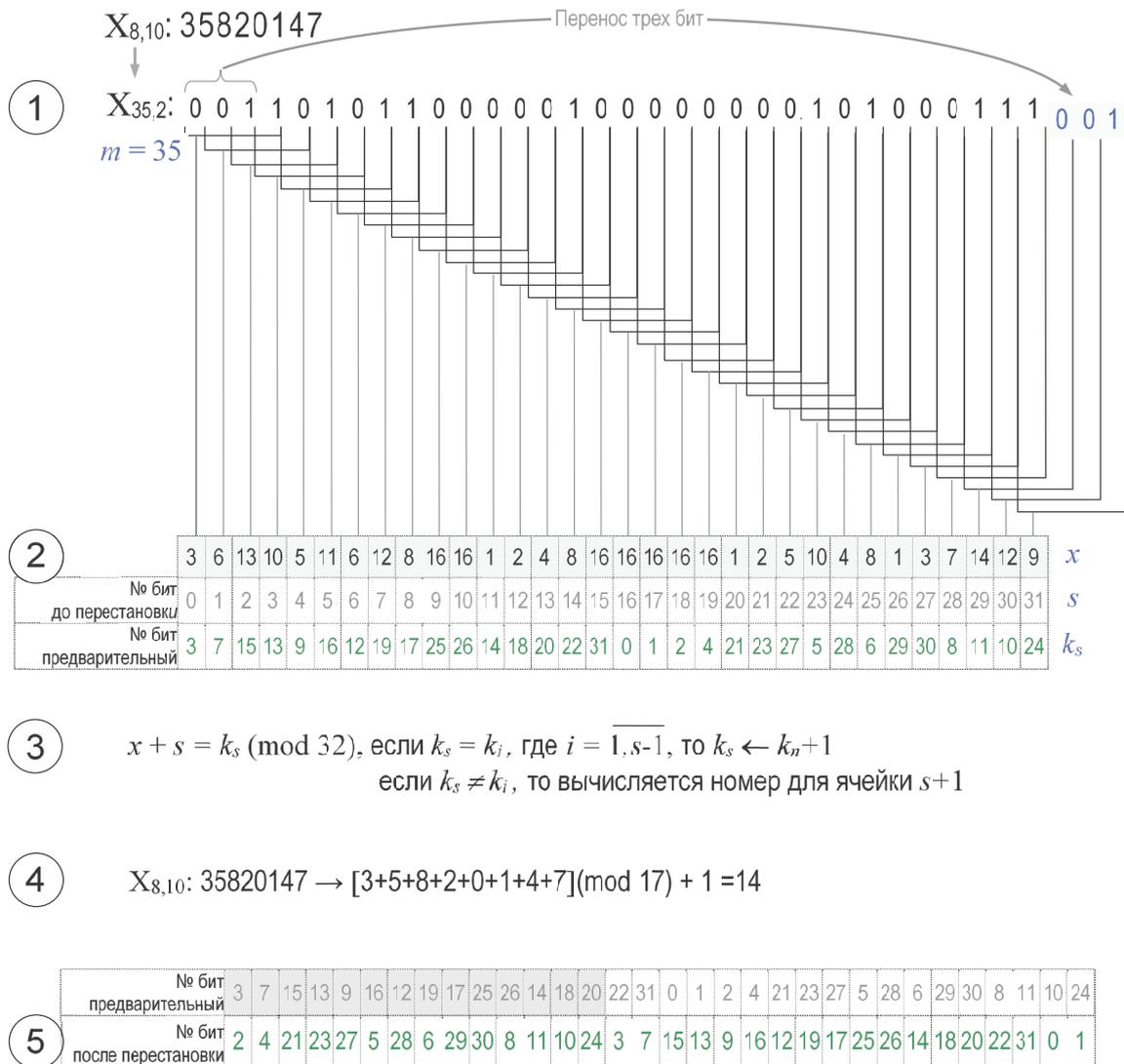


Рис. 1. Схема генерации единичной перестановки бит с использованием массива управляющих переменных – ключа: 35 820 147

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

трен на примере десятичного числа  $X_{8,10}$ : 35820147, выступающего в роли массива управляющих переменных или ключа для формирования новой последовательности порядковых номеров бит для любого 32-двух разрядного двоичного числа.

На самом деле жесткой привязки к 32-ум разрядам нет. Это может быть и 26 или 29 и даже 35 разрядов. Меняя по некоторому правилу разрядность ключа (увеличивая или уменьшая число содержащихся в нем бит), можно менять и разрядность преобразуемого числа. Правила могут быть самые разные исходя из особенностей решаемой задачи и разрядности используемых или получающихся в ходе ее решения чисел. В приведенном примере рассмотрено правило – «немодифицирующая конкатенация 3 бит справа». Вы можете придумать свои правила. Суть алгоритма это не меняет.

Как уже говорилось выше, алгоритм осуществляет перестановку не самих бит этого числа, а перестановку их номеров, т.е. перестановку чисел натурального ряда, в данном случае от 0 до 31. Практически речь идет о построении схемы (таблицы) перестановки номеров бит.

Сама битовая последовательность, к которой будет применяться эта перестановка, в данном случае значения не имеет. Но, если заданы требования к обеспечению частных показателей криптостойкости, необходимо обратить внимание на равномерность распределения в ней нулей и единиц. Например, вероятность того, что битовая последовательность, получающаяся в результате применения данной перестановки к исходной последовательности бит, может быть подобрана с первой попытки (случайно выбрана из всех возможных вариантов перестановок) равна

$$P_n^1 = \frac{n_1! n_2!}{n!}.$$

При этом, если  $n=32, n_1=16, n_2=16$ , то  $P_n^1=1,7 \cdot 10^{-9}$ ;

$n_1=16, n_2=16$ , то  $P_n^1=1,7 \cdot 10^{-9}$ ;

$n=32, n_1=14, n_2=18$ , то  $P_n^1 \approx 2,1 \cdot 10^{-9}$ ;

$n=32, n_1=10, n_2=22$ , то  $P_n^1 \approx 1,6 \cdot 10^{-8}$ .

Описание алгоритма генерации единичной перестановки бит с использованием функции  $F_n(X_{n,2})_k$  может быть представлен следующей последовательностью действий:

1) каждая цифра числа 35820147 записывается тетрадой бит:

$$X_{32,2}^{35820147}: 0011\ 0101\ 1000\ 0010\ 0000\ 0001\ 0100\ 0111;$$

2) к полученной битовой последовательности справа приписывается три первых получившихся бита (в данном примере это 001):

$$X_{(32+3),2}^{35820147}: 0011\ 0101\ 1000\ 0\ 010\ 0000\ 0001\ 0100\ 0111\ 001_{35};$$

3) тетрады бит со сдвигом на 1 бит преобразуются в десятичные числа (см. рисунок 1), принимающие значения от 1 до 16. При этом  $x_i=0000_2$  принимается равным 16;

4) получаются 32 тетрады, образующие последовательность из 32-х десятичных чисел  $x_i$ :

$$x: 2\ 6\ 13\ 10\ 5\ 11\ 6\ 12\ 8\ 16\ 16\ 1\ 2\ 4\ 8\ 16\ 16\ 16\ 16\ 16\ 1\ 2\ 5\ 10\ 4\ 8\ 1\ 3\ 7\ 14\ 12\ 9;$$

5) далее используется правило поразрядного сложения последовательностей, состоящих из чисел  $x$  и порядковых номеров бит  $s$  (где  $s=0, n-1$ , с учетом того, что их сумма увеличивается каждый раз на единицу, если полученное в результате на  $s$ -ом шаге суммирования число  $k_s$  уже встречалось на предыдущих шагах вычислений). При этом число  $k_s$  может циклически увеличиваться на единицу столько раз сколько требуется для исключения совпадений с результатами всех предыдущих вычислений. Такое преобразование является необратимым из-за наличия неоднозначности обратного пересчета полученного номера бита в его исходный номер.

Таким образом, используя формулу  $x+s=k_s \pmod{32}$ , при выполнении условий:

если  $ks = ki$ , где  $i=0, s-1$ , то  $k_s \leftarrow k_s + 1$ ;

если  $ks \neq ki$ , то вычисляется номер для ячейки  $s+1$ ,

где  $s$  – порядковый номер бита в исходной упорядоченности бит числа к которому применяется функция  $F_n(X_{n,2})_k$ ,

рассчитывается число  $k_s$ , определяющее новый предварительный порядковый номер бита  $s$  (или новое позиционное место бита за номером  $s$ ) в новой упорядоченности бит числа  $X_{n,2}$ , см. рисунок 1 строка  $k_s$ .

6) определяется сумма по модулю 17 всех цифр, составляющих десятичное число  $X_{8,10}$ , к которой прибавляется единица, чтобы избежать нулевых значений:

$$\sum_{j=1}^r c_j \pmod{17} + 1, \text{ где } c_j \in X_{r,s}, r - \text{ количество разрядов, } s - \text{ система счисления.}$$

В данном примере:

$$X_{8,10}: 35820147 \rightarrow [3+5+8+2+0+1+4+7] \pmod{17} + 1 = 30 \pmod{17} + 1 = 14.$$

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

7) Рассчитанное в п. 6 число определяет на сколько позиций вправо циклически сдвигается полученная в п. 5 последовательность натуральных чисел. Для данного примера это циклический сдвиг на 14 позиций вправо:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	→																		
№ бит: после перестановки:	3	7	15	13	9	16	12	19	17	25	26	14	18	20	22	31	0	1	2	4	21	23	27	5	28	6	29	30	8	11	10	24	$k_n$
№ бит: после сдвига:	2	4	21	23	27	5	28	6	29	30	8	11	10	24	3	7	15	13	9	16	12	19	17	25	26	14	18	20	22	31	0	1	$\Pi_{32}^n$

**Примечание.** Таким образом, значение модуля определяет максимально возможное количество позиций, на которые могут сдвигаться биты. Чем больше значение модуля, тем на больше число позиций возможен сдвиг. В таблице 1 показано как меняется величина сдвига в зависимости от значений модуля и используемого для перестановки ключа.

**Таблица 1**  
Изменение величины сдвига в зависимости от значений модуля и используемого для перестановки ключа

Ключ $C_{r,s}$								$\sum_{j=1}^8 c_j$	Величина сдвига				
$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$	$c_7$	$c_8$		mod 7 + 1	mod 9 + 1	mod 11 + 1	mod 17 + 1	mod 26 + 1
3	5	8	2	0	1	4	7	30	3	4	9	14	5
9	0	7	3	6	4	1	5	35	1	9	3	2	10
0	8	2	6	5	3	1	7	32	5	6	11	16	7
1	3	0	1	0	2	1	0	8	2	9	9	9	9
8	9	5	4	7	2	6	7	48	7	4	5	15	23
1	3	8	2	0	7	5	0	26	6	9	5	10	1
0	9	5	4	7	2	6	3	36	2	1	4	3	11

8) Записанная в строке  $\Pi_{32}$  последовательность цифр определяет новые порядковые номера бит и, собственно, схему их перестановки на ключе 35820147 для любого 32-х разрядного двоичного числа:

исходные № бит:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	$\Pi_{32}$
новые № бит:	2	4	21	23	27	5	28	6	29	30	8	11	10	24	3	7	15	13	9	16	12	19	17	25	26	14	18	20	22	31	0	1	$\Pi_{32}$

т.е. на нулевое место становится 2-ой бит, на первое место – 4-й бит, на второе место – 21-й бит и т.д. *Конец алгоритма.*

Как видно транспозиций элементов (обмена порядковых номеров бит до и после перестановки) в данной схеме перестановки нет. Единичные случаи такого обмена местами двух элементов могут иметь место, но они возникают случайно и крайне редко (на тысячу ключей выпадает 2-3 единичных транспозиции элементов).

Также важным моментом является тот факт, что если изменить один разряд в ключе  $C_{8,10}$ , например 35 826 147, 39 820 147, 05 820 147 (исходное число 35 820 147), то новые последовательности номеров бит, порождаемых этими ключами, будут существенно отличаться от исходной последовательности и друг от друга:

исходные № бит:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
35 820 147 → № бит:	2	4	21	23	27	5	28	6	29	30	8	11	10	24	3	7	15	13	9	16	12	19	17	25	26	14	18	20	22	31	0	1
35 82 <u>6</u> 147 → № бит:	11	10	8	3	7	15	13	9	16	12	19	17	25	26	14	18	20	23	21	22	29	27	4	24	28	30	1	31	2	0	5	6
<u>3</u> 9 820 147 → № бит:	24	3	8	16	13	14	9	12	19	17	25	26	15	18	20	22	31	0	1	2	4	21	23	27	5	28	6	29	30	7	11	10
<u>0</u> 5 820 147 → № бит:	23	27	24	28	9	29	30	10	11	18	20	0	2	4	7	13	8	12	19	16	25	26	14	15	17	22	31	1	3	5	6	21

Таким образом, рассматриваемый алгоритм позволяет при незначительном изменении ключа существенно изменять последовательность номеров бит в каждой новой схеме перестановки.

### Обратная перестановка

Схема обратной перестановки представлена функцией  $F_{\text{он}}(X_{n,2}^*)$ , где  $X_{n,2}^*$  –  $n$  разрядное двоичное число, которое получено в результате преобразования исходной последовательности номеров бит некоего числа  $X_{n,2}$  в новую их последовательность, в соответствии с которой были упорядочены биты числа  $X_{n,2}$ . Т.е. в результате при менения к числу  $X_{n,2}$  функции  $F_{\text{н}}(X_{n,2})$ .

Для того, чтобы вернуть биты числа  $X_{n,2}^*$  на их исходные позиции (т.е. получить число  $X_{n,2}$ ) надо знать их исходную упорядоченность. Каким-либо образом определить ее

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

по самому числу  $X_{n,2}^*$  невозможно. Также отсутствуют какие-либо закономерности в имеющейся упорядоченности бит. Если для криптоанализа может быть использован метод полного перебора, то математическое ожидание времени подбора нужной перестановки в 32 бита при скорости генерации 10000 перестановок<sup>2</sup> в секунду составит примерно 8-9 часов. Конечно, учитывая возможности современных вычислительных систем, время может быть еще меньше, но не стоит забывать, что это «взлом» всего лишь одного криптопримитива, который может быть использован в сложной схеме криптографических преобразований в сочетании с десятками других криптопримитивов.

Алгоритм обратной перестановки бит с использованием функции  $F_{\text{он}}(X_{n,2}^*)_k$  состоит в следующем:

1) определяется сумма по модулю 17 всех цифр, составляющих десятичное число  $X_{8,10}$ , к которой прибавляется единица:

$$\sum_{j=1}^r c_j \pmod{17} + 1.$$

В рассмотренном выше примере:

$$X_{8,10}: 35\ 820\ 147 \rightarrow [3+5+8+2+0+1+4+7] \pmod{17} + 1 = 30 \pmod{17} + 1 = 14.$$

2) рассчитанное в  $n$ . 1 число определяет на сколько позиций влево циклически сдвигается последовательность бит в числе, которому необходимо вернуть исходную их нумерацию (или их исходную упорядоченность).

Например. Если в результате применения ключа  $X_{8,10}: 35\ 820\ 147$  был изменен порядок следования бит в некотором числе  $X_{32,2}$ , в результате чего было получено новое число  $X_{32,2}^*$ :

←

0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

то для возвращения исходного порядка бит на первом шаге необходимо циклически сдвинуть последовательность бит на 14 позиций влево:

0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

3) выполняются *n.n.* 1-5 алгоритма прямой битой перестановки, в результате имеет место уже знакомая схема прямой перестановки:

№ бит до перестановки	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
№ бит после перестановки	3	7	15	13	9	16	12	19	17	25	26	14	18	20	22	31	0	1	2	4	21	23	27	5	28	6	29	30	8	11	10	24

4) для получения обратной схемы перестановки номеров бит в данной схеме первая и вторая строка меняются местами и дописывается третья строка, в которой прописываются порядковые номера бит, возвращающие их исходное положение:

№ бит после перестановки	3	7	15	13	9	16	12	19	17	25	26	14	18	20	22	31	0	1	2	4	21	23	27	5	28	6	29	30	8	11	10	24
№ бит до перестановки	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
№ бит после обратной перестановки	16	17	18	0	19	23	25	1	28	4	30	29	6	3	11	2	5	8	12	7	13	20	14	21	31	9	10	22	24	26	27	15

В основе возврата бит на исходные их позиции лежит простая логическая процедура, заключающаяся в обратной перестановке их порядковых номеров. Так, например, бит за номером «0» (первая строка) после перестановки получил номер «16» (вторая строка). Следовательно, 16-й бит возвращается на нулевое место. Бит за номером «8» (первая строка) после перестановки получил номер «28» (вторая строка). Следовательно, 28-й бит возвращается на восьмое место, и т.д.

В заключение необходимо отметить, что применение функции  $F_{\text{он}}(X_{n,2}^*)_k$  к числу, к которому не применялась функция  $F_{\text{н}}(X_{n,2})_k$ , смысла не имеет. В то же время, зная алгоритм обратной перестановки и число, к которому была применена функция  $F_{\text{н}}(X_{n,2})_k$ , но не имея ключа, восстановить исходное число невозможно.

### Литература

1. Бабенко Л.К., Ищукова Е.А. Криптографическая защита информации: симметричное шифрование: учебное пособие. Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2015. С.15-22.
2. Стенли Р. Перечислительная комбинаторика. М.: Мир, 1990. С.107-108.
3. Федоряева Т.И. Комбинаторные алгоритмы: Учебное пособие / Новосибирск: НГУ, 2011. 118 с.

<sup>2</sup> Включая сюда и операции определения удовлетворения сгенерированной последовательности требуемым условиям.

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 629.76

## О ВЛИЯНИИ УГЛОВОГО ДВИЖЕНИЯ ОТДЕЛЯЮЩИХСЯ ЧАСТЕЙ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СРЕДСТВ ВЫВЕДЕНИЯ НА ОТКЛОНЕНИЕ ВОЗМОЖНЫХ ТОЧЕК ПАДЕНИЯ В ЗАДАННЫЙ РАЙОН

## ON THE INFLUENCE OF THE ANGULAR MOTION OF THE SEPARATING PARTS OF PROMISING LAUNCH VEHICLES ON THE DEVIATION OF POSSIBLE POINTS OF IMPACT INTO A GIVEN AREA

**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 АИН*

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*

доцент кафедры «Бортовых  
информационных и оптико-электронных  
средств космических аппаратов»

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

В статье рассмотрена математическая модель возмущенного движения отделяющихся частей перспективных средств выведения, предложен подход к оценке влияния углового движения отработавших ступеней на отклонение точек падения в заданном районе по результатам моделирования. Проведен анализ полученных результатов.

**Ключевые слова:** ракета-носитель, отделяющиеся части, перспективные средства выведения, возмущающие факторы, возможные точки падения, заданный район.

### Summary

The article considers a mathematical model of the perturbed movement of the separating parts of promising launch vehicles, an approach is proposed for assessing the influence of the angular movement of spent stages on the deviation of the points of impact in a given area based on the results of modeling. The analysis of the received results is carried out.

**Keywords:** launch vehicle, separating parts, promising launch vehicles, disturbing factors, possible impact points, given area.

### Введение

Первым этапом полета ракеты-носителя (РН) в штатном режиме является отделение в установленное время первой ступени, которая продолжает неуправляемое движение до падения на поверхность Земли. При движении отделяющиеся части (ОЧ) на пассивном участке траектории на нее действует множество возмущающих факторов (ВФ) [1,3]. Основное влияние на отклонение возможных точек падения (ВТП) ОЧ РН в заданный район (ЗР) оказывают атмосферное

давление, ветер, изменение массы ОЧ, коэффициент лобового сопротивления, начальные параметры движения ступени в момент ее отделения от РН, а так же угловое движение ОЧ РН при движении на пассивном участке траектории. Если исследованию влияния первых факторов посвящено множество работ, то влиянием углового движения занимаются мало. Это обуславливается трудоемкостью вычислительного процесса и как поясняют многие авторы незначительным влиянием на отклонение ВТП в ЗР.

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

### Математическая постановка задачи

Для решения задачи исследований необходимо построить модель возмущенного движения ОЧ перспективных средств выведения (ПСВ), которая может быть представлена в виде векторного нелинейного дифференциального уравнения

$$\frac{d\hat{X}}{dt} = \bar{F}(\hat{X}, \hat{\Delta c}, \hat{\Delta p}, \hat{I}, \hat{b}, t), \quad \hat{X}(t_0) = \bar{X}_T(t_0) + \Delta\hat{X}_0, \quad (1)$$

где « $\hat{\phantom{x}}$ » – показывает, что величина является случайной;

$\hat{X}(t) = \bar{X}_0(t) + \Delta\hat{X}(t)$  –  $n$ -мерный случайный вектор параметров движения ОЧ (здесь учитываются параметры движения центра масс ОЧ ПСВ, а также относительно центра масс ОЧ ПСВ), при этом:

$\bar{X}_0(t)$  – теоретическое значение параметров движения ОЧ ПСВ;

$\Delta\hat{X}(t)$  – вектор, учитывающий отклонения параметров движения ОЧ от расчетной траектории движения ПСВ;

$t$  – время движения ОЧ на пассивном участке [2];

$\hat{X}(t_0)$  – значение параметров движения ОЧ в момент ее отделения от ПСВ;

$\Delta\hat{X}_0 \in \Lambda_0$  – случайный вектор разброса параметров движения ОЧ в момент отделения от ПСВ;

$\hat{\Delta c}, \hat{\Delta p}, \hat{I}, \hat{b}$  – векторы случайных возмущений, оказывающих различное влияние на движение ОЧ после ее отделения от ПСВ.

При этом:

–  $\hat{\Delta c}$  – учет влияния отклонений коэффициента лобового сопротивления ОЧ ПСВ при ее движении на пассивном участке траектории;

–  $\hat{\Delta p}$  – учет влияния отклонений значения атмосферного давления на ОЧ ПСВ при ее движении на пассивном участке траектории;

–  $\hat{I}, \hat{b}$  – учет влияния отклонений меридиональной и зональной составляющих скорости ветра в заданном районе.

### Исследование влияния углового движения отделяющихся частей перспективных средств выведения на отклонение возможных точек падения в заданном районе

Заданный район представляется в виде эллипса рассеивания (ЭР) ВТП ОЧ ПСВ. Для определения параметров ЭР ОЧ с учетом ВФ, учтенных в модели (1), был использован программный комплекс, в котором реализован численный алгоритм решения системы дифференциальных уравнений на основе метода Рунге-Кутты четвертого порядка с переменным шагом

интегрирования. Общее число статистических испытаний модели возмущенного движения ОЧ ПСВ (1) составило 199000.

Оценка влияния углового движения ОЧ ПСВ на отклонения ВТП осуществлялась путем интегрирования уравнений движения центра масс ОЧ при номинальных значениях параметров ПСВ, номинальных значениях термодинамических параметров атмосферы и отсутствии ветра [2,3]. Полученная по результатам моделирования точка принималась за центр ВТП ОЧ РН. Затем интегрировалась полная система дифференциальных уравнений движения ОЧ ПСВ (с учетом углового движения) и определялась новая точка падения. Полученные отклонения точки падения  $\Delta L$  и  $\Delta B$  служат оценкой влияния углового движения на движение центра масс:  $\Delta L = 593$  м;  $\Delta B = 30$  м.

При случайных возмущениях термодинамических параметров атмосферы и «случайном» ветре учет углового движения может приводить к отклонению ВТП до 1 км и более.

Это подтверждает необходимость учета углового движения ОЧ ПСВ на пассивном участке в общей модели движения.

Разброс начальных условий движения ОЧ в диапазоне  $\pm 10^\circ$  по углу тангажа и  $\pm 2$  град/сек по угловой скорости приводит, в свою очередь к разбросу точек падения относительно номинального значения от единиц метров до 1,2 км.

На *рисунке 1а* приведена зависимость высоты полета  $h$ , модуля скорости  $V$ , скоростного напора  $q$ , полной аэродинамической силы  $R^A$  при движении центрального блока на пассивном участке траектории при номинальных значениях.

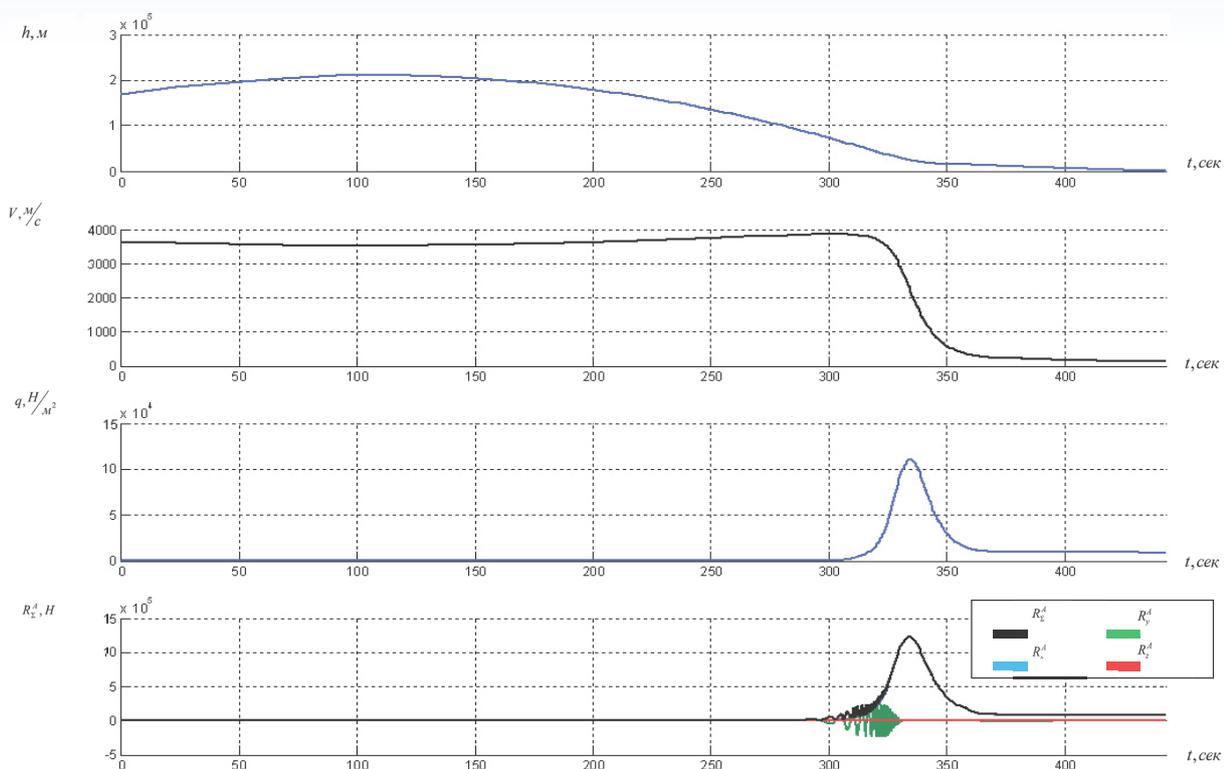
На *рисунке 1б* для этих же условий приведены зависимости от времени полета на пассивном участке угловых скоростей ОЧ  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  углов тангажа  $\vartheta$ , рыскания  $\psi$  и крена  $\phi$ , углов атаки  $\alpha$  и скольжения  $\beta$ , а также углов наклона вектора скорости и продольной оси ПСВ  $\Theta_y, \Theta_x$ , к местному горизонту.

На *рисунках 2а* и *2б* приведены соответственно те же зависимости, что и на *рисунках 1а* и *1б* для случая отклонения начальных условий движения ОЧ от номинальных:

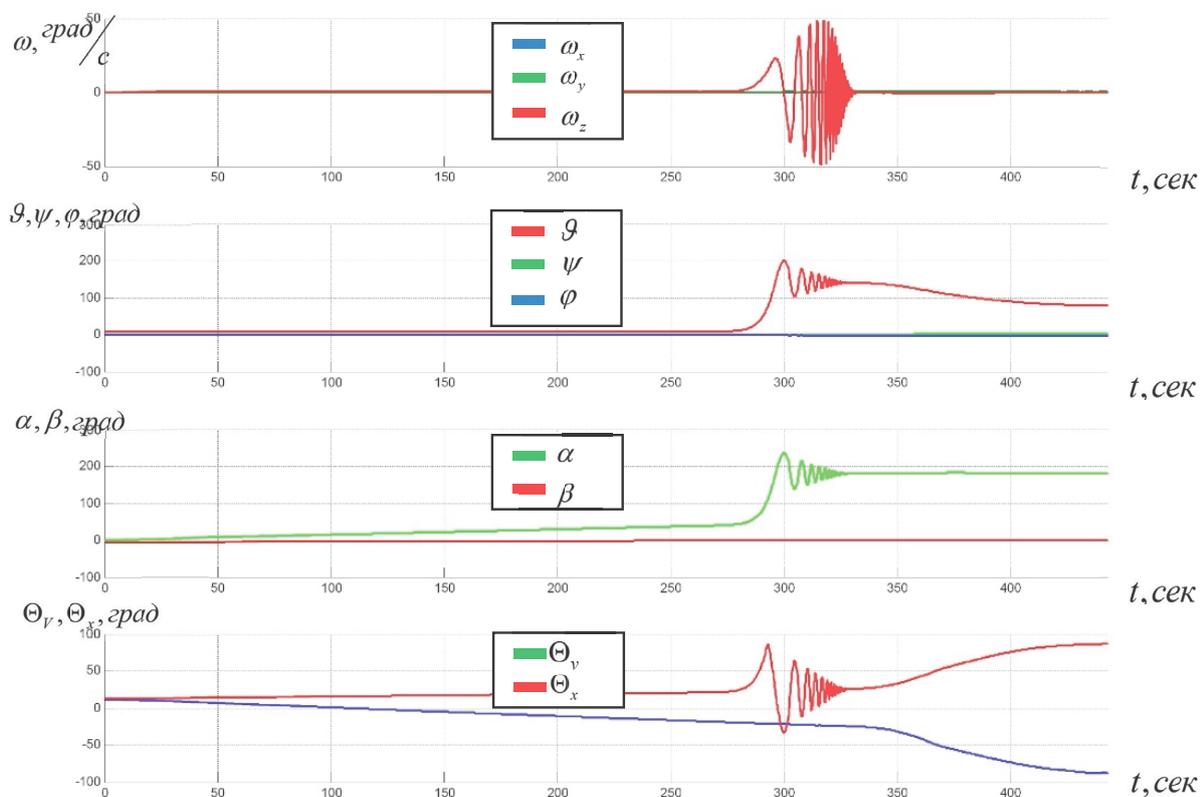
$$\omega_z = 1 \frac{\text{град}}{\text{сек}} \text{ и } \Delta\vartheta = 10 \text{ град.}$$

Проведенные исследования показывают, что отклонения начальных условий движения по угловой скорости для бокового блока может достигать 10 град/сек для центрального блока схема разделения используется другая и возмущения начальных условий по угловой скорости обычно не превышают 3 град/сек.

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ



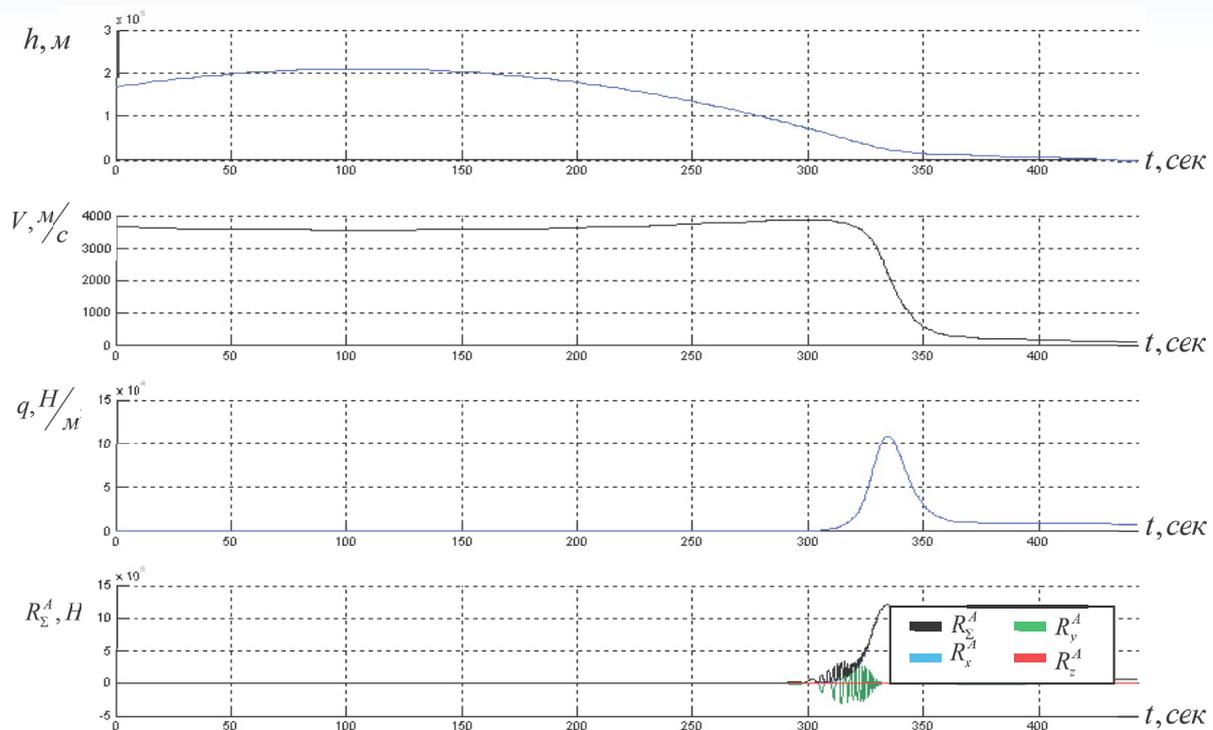
а)



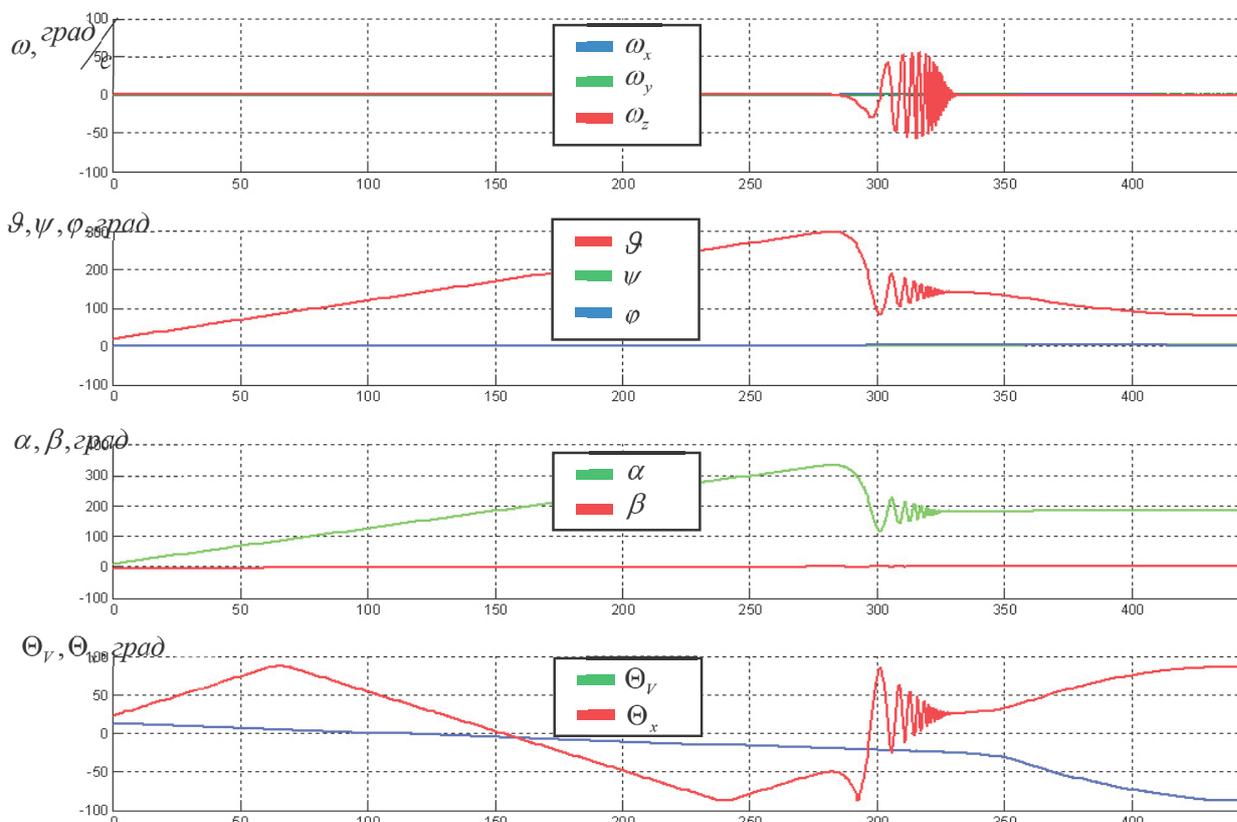
б)

**Рис. 1.** Параметры движения отделяющихся частей при номинальных начальных условиях

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ



a)



b)

Рис. 2. Параметры движения отделяющихся частей при  $\omega_z = 1 \text{ град/сек}$  и  $\Delta \theta = 10 \text{ град}$

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

### Анализ полученных результатов

Для оценки влияния отклонений начальных условий углового положения варьировались значения угловой скорости  $\omega_z$  по оси  $z$  ССК и отклонений по углу тангажа  $\Delta\vartheta$  от значения на

**Таблица 1**

Оценка влияния отклонений начальных условий углового положения

	$\Delta\vartheta$ , град	$\Delta L$ , м	$\Delta B$ , м
$\omega_z = -2$ град./сек	-10	81	-16
	-5	94	-15
	0	72	-17
	5	88	-15
	10	65	-16
$\omega_z = -1$ град./сек	-10	-90	-18
	-5	-86	-18
	0	-53	-18
	5	-58	-19
	10	-43	-19
$\omega_z = 0$ град./сек	-10	-21	4
	-5	-77	1
	0	0	0
	5	-62	-3
	10	-99	-6
$\omega_z = 1$ град./сек	-10	-928	-39
	-5	-1069	-43
	0	-1165	-45
	5	-1237	-45
	10	-1273	-45
$\omega_z = 2$ град./сек	-10	48	-13
	-5	32	-13
	0	-18	-14
	5	-96	-17
	10	-120	-17

момент отделения ОЧ от ПСВ. Промах оценивался относительно точки падения, получаемой в результате моделирования с учетом углового движения при отсутствии отклонений начальных условий углового положения. Результаты моделирования представлены в *таблице 1*.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что наибольшее влияние углового движения на величину конечного промаха будет при нулевом угле атаки на момент входа в плотные слои атмосферы.

### Заключение

Проведенное исследование показывает, что отклонение параметров углового движения ОЧ ПСВ от расчетных значений может привести к изменению координат точек падения ОЧ в ЗР. При условии, изменения бокового ветра и других ВФ, это может привести к падению ОЧ ПСВ за пределами ЗР. В связи с этим при проектировании ПСВ и моделировании их движения необходимо учитывать влияние углового движения ОЧ наряду с рассмотренными ВФ, влияющими на ОЧ на пассивном участке траектории движения.

### Литература

1. Сихарулидзе Ю.Г. Баллистика летательных аппаратов. М.: Наука, 1982. 352 с.
2. Казаков Р.Р. Модель закона распределения координат точек падения отделяющихся частей перспективных средств выведения / Р.Р. Казаков, В.А. Захаров, Д.В. Смирнов // Известия Института инженерной физики, 2021. №1(59). С.20-23.
3. Казаков Р.Р. Исследование влияния различных возмущающих факторов на отклонение координат точек падения отделяющихся частей ракет-носителей / Р.Р. Казаков, Э.Р. Мингалиев // «Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу». М.: ОКНТПР, 2015. №2(126). С.29-35.



# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.8.004.9

## УПРАВЛЕНИЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ ПО УГЛУ КУРСА НА ОСНОВЕ МЕТОДА РАЗНОСТИ СКОРОСТЕЙ

## CONTROL OF A ROBOTIC COMPLEX ALONG THE COURSE ANGLE BASED ON THE METHOD OF SPEED DIFFERENCE

**Юрий Александрович Пушкарёв**  
заслуженный деятель науки 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 (916) 609-18-23  
E-mail: calgon100@yandex.ru

**Елена Юрьевна Пушкарёва**  
доктор технических наук, профессор  
профессор кафедры  
филиал ВА РВСН им. Петра Великого  
(г. Серпухов)  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17  
Тел.: 8 (915) 192-74-39  
E-mail: calgon100@yandex.ru

**Игорь Викторович Пискулин**  
преподаватель кафедры  
филиал ВА РВСН им. Петра Великого  
(г. Серпухов)  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17  
Тел.: 8 (925) 725-06-36  
E-mail: pikselzte@gmail.com

### Аннотация

Произведен анализ возможных вариантов управления движением робототехнического комплекса (РТК) по углу курса на основе метода разностей угловых скоростей, создаваемых электрическими приводами. Приведены результаты исследования точности управления для программной и терминальной систем автоматического управления (САУ) в среде визуального программирования «Simulink».

**Ключевые слова:** мобильные робототехнические комплексы военного назначения, система автоматического управления, метод программного управления, методы терминального и оптимального терминального управления углом курса РТК.

### Summary

An analysis of possible options for controlling the movement of a robotic complex (RC) along the course angle based on the method of differences in angular velocities created by electric drives is made. The results of the study of control accuracy for software and terminal automatic control systems (ACS) in the visual programming environment «Simulink» are presented.

**Keywords:** mobile robotic complexes for military purposes, automatic control system, program control method, methods of terminal and optimal terminal control of the RTK heading angle.

### Введение

В настоящее время робототехнические комплексы, несущие на своей платформе измерительные средства различной физической природы (оптические, инфракрасные, радиолокационные и др.) применяются во многих сферах человеческой деятельности. В частности, широкое распространение они получили при охране элементов ракетно-космической техники [1,2] при решении задач обнаружения, распознава-

ния и измерения координат и параметров движения объектов вторжения в охраняемую зону. В ряде работ, например, в [1,3], показано, что высококачественное обнаружение и распознавание объекта вторжения производится в процессе сближения с ним. При этом уменьшение дальности до искомого объекта улучшает линейное разрешение на его поверхности и увеличивает отношение сигнал/шум. Также увеличивается наблюдаемая площадь, так как уменьшает-

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ся степень загромождаемости искомого объекта другими объектами и рельефом местности.

Учитывая тот факт, что элементы ракетно-космической техники могут находиться в труднодоступных для движения РТК рельефах местности (лесистая местность, неровности поверхности и др.) для исследования управляемого движения робота выбран РТК гусеничного типа, так как он способен преодолевать большие препятствия и имеет значительную площадь контакта с поверхностью перемещения [2].

Известно также, что использование РТК гусеничного типа приводит к необходимости применения метода управления углом курса РТК по разности скоростей [3,4]. Например, в [3], в связи с этим, вводится отношение скоростей степеней подвижности, т.е. отношение соответствующих скоростей гусениц (лент). Это приводит к тому, что в системе управления углом курса робота появляется коэффициент подвижности, который будет непосредственно влиять на устойчивость при его изменении.

Исходя из изложенного, следует, что в данной работе *объектом исследования* является система автоматического управления (САУ) углом курса РТК, работающая по методу разности скоростей.

Часто на практике при решении задачи управления углом курса РТК на основе разности скоростей используются программные САУ [4] или терминальные САУ [5]. В этом и других

случаях необходимо учитывать влияние отношения скоростей степеней свободы на устойчивость системы управления углом курса.

При этом следует иметь ввиду, что терминальные САУ имеют преимущество перед программными в том смысле, что у них имеются большие возможности по реализации заданных терминальных условий.

Поэтому *предметом исследования* в данной статье будут являться как программные, так и терминальные САУ углом курса (по сути, продольной осью РТК).

*Цель статьи* состоит в разработке вариантов управления движением РТК по углу курса на основе метода разности скоростей с исследованием точности управления на электронных схемах.

### 1. Структурные схемы замкнутых САУ углом курса по методу разности скоростей

Особенностью САУ, реализующей метод разности скоростей, является то, что в разомкнутой части системы управления должны быть два канала передачи управляющего воздействия (на одну ленту и на другую).

Один из вариантов такой САУ углом курса показан на *рисунке 1.1*.

На данном рисунке  $\varepsilon_k$  – ошибка воспроизведения заданного угла курса  $\psi_{зад}$ ,  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты усиления усилительных звеньев первого и второго каналов управления соответственно (коэффициенты подвижности, о которых упо-

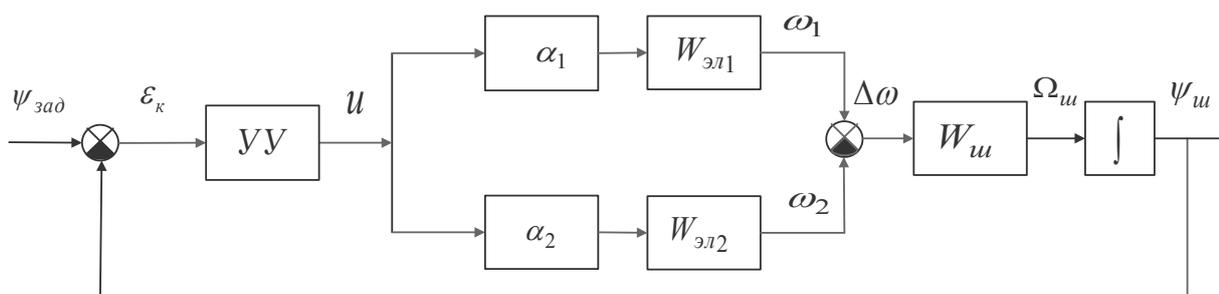


Рис. 1.1. Структурная схема двухканальной замкнутой САУ углом курса по методу разностей скоростей

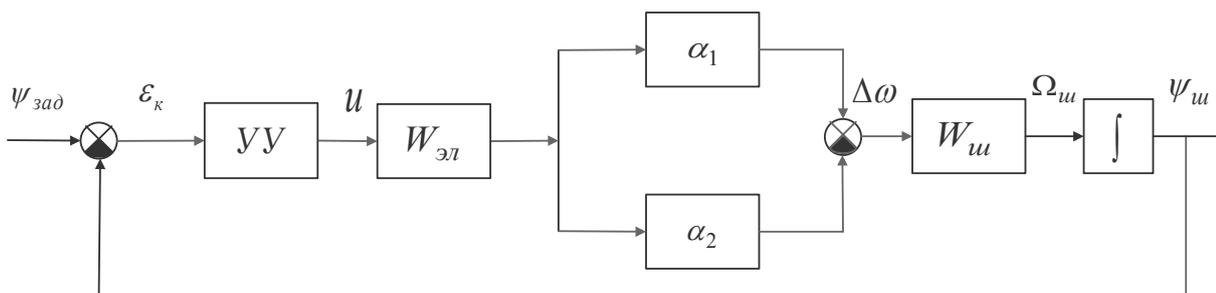


Рис. 1.2. Структурная схема двухканальной замкнутой САУ углом курса по методу разностей скоростей (путем понижения угловых скоростей лент)

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

миналось во введении, и которые определяют отношением угловых скоростей  $\omega_p, \omega_2$ ;  $\Omega_{ш}$  – угловая скорость изменения угла курса шасси, интегрирование которой дает угол курса шасси робота  $\psi_{ш}$ .

Кроме того, на данном рисунке УУ – устройство управления (регулятор),  $u$  – управляющее воздействие,  $W_{эл1}, W_{эл2}$  – динамические операторы электроприводов первого и второго каналов управления,  $W_{ш}$  – динамический оператор шасси. Следует заметить, что вместо электроприводов, как отмечено в [2], могут быть электромагниты. При этом управление гусеничным роботом будет осуществляться силой магнитного сцепления посредством электромагнита.

Следует заметить, что усилительные звенья  $\alpha_1, \alpha_2$  могут быть на выходе одного электропривода (если управление осуществляется за счет изменения передаточных чисел редукторов, т.е. путем понижения угловых скоростей лент).

Для данного варианта соответствующая схема двухканальной замкнутой САУ углом курса приведена на рисунке 1.2.

В отличие от схемы рисунка 1.1, где допускается наличие коэффициентов  $\alpha_1, \alpha_2$  больших единицы, в схеме рисунка 1.2 эти коэффициенты физически не могут превосходить значения больше единицы.

Рассмотрим варианты заданий значений коэффициентов  $\alpha_1, \alpha_2$  в обеих схемах. Целесообразность данного рассмотрения вытекает из необходимости преобразования двухканальных САУ в одноканальные, что связано в последующем с обоснованием и применением терминального управления.

### 2. Варианты управления углом курса РТК на основе метода разности скоростей

Рассмотрим два варианта управления углом курса РТК, связанных с особенностями структурных схем (рисунки 1.1 и рисунок 1.2).

#### 2.1. Варианты заданий коэффициентов $\alpha_1, \alpha_2$ при управлении путем увеличения угловой скорости (схема рисунок 1.1)

Для случая  $\alpha_1 > 1, \alpha_2 = 1$ , из схемы рисунка 1.1 имеем следующее выражение для параллельного согласного соединения передаточных функций первого и второго электроприводов (могут быть и электромагниты, если управление производится силой электромагнитного сцепления):

$$W_{nc}(P) = \alpha_1 W_{эл1}(P) - \alpha_2 W_{эл2}(P), \quad \alpha_2 = 1. \quad (2.1)$$

При равенстве передаточных функций (ПФ) обоих электроприводов имеем следующую ПФ параллельного соединения:

$$W_{nc}(P) = (\alpha_1 - 1) W_{эл1}(P), \quad \alpha_1 > 1. \quad (2.2)$$

Из той же схемы и выражения (2.2) имеем следующее выражение для разности угловых скоростей:

$$\Delta\omega(t) = (\alpha_1 - 1) W_{эл1}(P) u(t), \quad P = \frac{d}{dt}. \quad (2.3)$$

Отсюда видно, что увеличение коэффициента  $\alpha_1$  приводит к увеличению разности скоростей.

Для второго случая, когда  $\alpha_1 = 1, \alpha_2 > 1$ , используя (2.1), получим (с учетом равенства передаточных функций электроприводов):

$$W_{nc}(P) = (1 - \alpha_2) W_{эл1}(P), \quad \alpha_2 > 1. \quad (2.4)$$

Тогда выражение для разности скоростей, с учетом выноса знака минус из выражения  $(1 - \alpha_2)$ , примет вид:

$$\Delta\omega(t) = -(\alpha_2 - 1) W_{эл1}(P) u(t), \quad P = \frac{d}{dt}. \quad (2.5)$$

Отсюда видно, что разность  $\Delta\omega$  стала отрицательной, и поворот шасси робота будет происходить в другую сторону (противоположную той, что определяется по выражению (2.3)).

Из анализа приведенных выражений следует, что при управлении путем увеличения скоростей в разомкнутом канале САУ появляется множитель  $(a - 1)$ , где  $a$  принимает значение больше единицы (в одном случае  $\alpha_1 > 1$ , а в другом случае  $\alpha_2 > 1$ ).

#### 2.2. Варианты заданий коэффициентов $\alpha_1, \alpha_2$ при управлении путем уменьшения угловой скорости

Для случая  $\alpha_1 = 1, \alpha_2 < 1$ , используя выражение (2.1), имеем:

$$W_{nc}(P) = (1 - \alpha_2) W_{эл1}(P), \quad \alpha_2 < 1. \quad (2.6)$$

Тогда выражение для разности скоростей примет вид:

$$\Delta\omega(t) = (1 - \alpha_2) W_{эл1}(P) u(t), \quad P = \frac{d}{dt}, \quad (2.7)$$

что при уменьшении коэффициента  $\alpha_2$  приводит к увеличению разности скоростей.

Во втором случае, когда  $\alpha_2 = 1, \alpha_1 < 1$ , также используя (2.1), получим:

$$W_{nc}(P) = (\alpha_1 - 1) W_{эл1}(P), \quad \alpha_1 < 1. \quad (2.8)$$

Точно также (как и в выражении (2.4)), вынося знак минус из выражения  $(\alpha_1 - 1)$ , и умножая правую часть выражения (2.8) на управление  $u(t)$ , имеем:

$$\Delta\omega(t) = -(1 - \alpha_1) W_{эл1}(P) u(t), \quad P = \frac{d}{dt}. \quad (2.9)$$

Отсюда видно, что разность скоростей снова стала отрицательной, и поворот шасси робота будет происходить в другую сторону.

Из анализа приведенных выражений, как и ранее, также следует, что при управлении путем уменьшения скорости в разомкнутом канале САУ появляется множитель  $(1 - a)$ , где  $a$  принимает значение меньше единицы.

Отсюда следует, что при обоих вариантах задания коэффициентов  $\alpha_1, \alpha_2$  в разомкнутом кана-

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ле САУ при управлении по разности скоростей появляется усилительное звено с коэффициентом усиления:

$$W(\alpha) = \begin{cases} (\alpha - 1), & \text{при } \alpha > 1, \\ (1 - \alpha), & \text{при } \alpha < 1. \end{cases} \quad (2.10)$$

Для того, чтобы избежать влияния коэффициента подвижности  $\alpha$  на устойчивость замкнутой программной системы необходимо в разомкнутом канале управления иметь множитель:

$$K(\alpha) = W^{-1}(\alpha) = \begin{cases} \frac{1}{\alpha - 1}, & \alpha > 1, \\ \frac{1}{1 - \alpha}, & \alpha < 1. \end{cases}$$

Результаты приведенных исследований сведены в таблицу 2.1.

Полярность угла в таблице 2.1 поставлена исходя из результатов интегрирования скоростей в схемах рисунков 1.1 и 1.2: положительный угол курса шасси образуется путем интегрирования положительной разности  $\Delta\omega$ , а отрицательный – путем интегрирования отрицательной разности скоростей  $-\Delta\omega$ .

Из таблицы 2.1 также видно, что передаточная функция параллельного согласного соединения двух звеньев будет зависеть от коэффициента подвижности  $\alpha$ , т.к. в нее входит усилительное звено с коэффициентом (2.10), т.е.:

$$W_{nc}(P, \alpha) = W(\alpha)W_{\text{эл}}(P). \quad (2.11)$$

Поэтому ПФ разомкнутой САУ, связывающая управление  $u$  с углом шасси  $\psi_{ш}$ , примет вид:

$$W_p(P, \alpha) = \frac{\psi_{ш}(P)}{u(P)} = W(\alpha)W_{\text{эл}}(P)W_{\text{ин}}(P)P^{-1}, \quad (2.12)$$

где  $P^{-1}$  – это интегрирующее звено (см. рисунки 1.1 и 1.2).

Передаточную функцию (2.12) можно считать математической моделью объекта управления для синтеза управляющего устройства (УУ) при заданных начальных и конечных условиях по углу курса  $\psi$  как для программной, так и для терминальной САУ.

### 3. Результаты исследования точности управления движением РТК на электронных схемах

Для исследования точности управления по углу курса была выбрана программная система (рисунок 1.1), а также терминальная система разомкнутого типа.

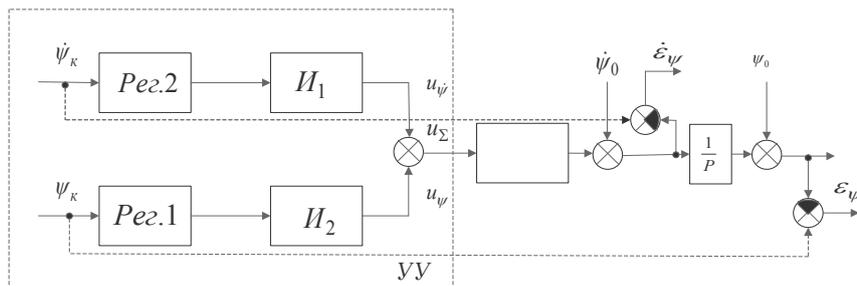
#### 3.1. Математическое описание терминальной системы автоматического управления разомкнутого типа

Терминальные САУ могут быть как замкну-

**Таблица 2.1**

Возможные варианты управления гусеничным роботом по углу курса на основе метода разности угловых скоростей

Способ управления	Управление путем увеличения скорости	Управление путем уменьшения скорости
Знак угла $\psi_{ш}$		
Положительный		
Отрицательный		



**Рис. 3.1.** Структурная схема терминальной САУ углом курса робота гусеничного типа

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

тыми, так и разомкнутого типа [5]. Как показано в [4,5] в замкнутых системах существует противоречие между точностью и устойчивостью, которое отсутствует в системах разомкнутого типа. Кроме того, в разомкнутых системах отсутствует необходимость измерения управляемой величины (угла курса) и ее скорости изменения. Это приводит, в свою очередь, к упрощению конструкции САУ. Поэтому, исходя из данных соображений, выбрана терминальная САУ разомкнутого типа, изображенная на *рисунке 3.1*.

На данном рисунке ИЧ – это инерционная часть САУ, определяемая по выражению (2.12), но без интегрирующего звена  $P$ ; Рег.1 и Рег.2 – это регуляторы для воспроизведения координаты и ее скорости в конечный момент времени соответственно; И1 и И2 – инверторы для передаточной функции инерционной части;  $\psi_0$  и  $\dot{\psi}_0$  – координата и скорость ее изменения в начальный момент времени соответственно;  $\varepsilon_\psi$  и  $\varepsilon_{\dot{\psi}}$  – ошибки воспроизведения координаты и ее скорости соответственно;  $u_\psi$  и  $u_{\dot{\psi}}$  – управляющие воздействия от канала координаты и канала скорости соответственно;  $\psi_\varepsilon$  и  $\dot{\psi}_\varepsilon$  – координата и скорость ее изменения в конечный момент времени соответственно.

При этом передаточные функции обоих регуляторов удовлетворяли требованиям третьей терминальной формы инвариантности и имели вид [5]:

$$W_{\text{рег.1}}(P, t_k, t) = \frac{B_1(P, t_k, t)}{C_1(P)}, W_{\text{рег.2}}(P, t_k, t) = \frac{B_2(P, t_k, t)}{C_2(P)} \quad (3.1)$$

Здесь полиномы  $B_1$  и  $B_2$  обеспечивают указанную инвариантность (обращение в ноль ошибок управления) при  $t=t_k$ , а полиномы  $C_1$  и  $C_2$  обеспечивают физическую реализуемость регуляторов по академику Петрову Б.Н.

Кроме того, полиномы  $B_1$  и  $B_2$ , как показано в [6], должны иметь вид:

$$B_1(P, t_k, t) = b_{11}(1 - \beta^i(t_k, t))P, \quad B_2(P, t_k, t) = b_{20}(1 - \beta^i(t_k, t)), \quad i = 1, 2, \dots, k, \quad (3.2)$$

$$C_1(P) = C_{10}, \quad C_2(P) = C_{20} \quad (3.3)$$

а модулирующая функция

$$\beta^i(t_k, t) = \left( \frac{t_k - t}{t_k} \right)^i, \quad i = 1, 2, \dots, k. \quad (3.4)$$

Расчет коэффициентов регулятора был произведен из условия третьей терминальной формы инвариантности для  $i=2$ :

$$b_0 = C_{20} \left( 1 - \frac{\dot{\psi}_0}{\psi_k} \right), \quad b_1 = C_{10} \left( 1 - \frac{2}{3} \frac{t_k}{\psi_k} \dot{\psi}_k - \frac{1}{3} \frac{t_k}{\psi_k} \dot{\psi}_0 - \frac{\psi_0}{\psi_k} \right). \quad (3.5)$$

В связи с тем, что конечная скорость  $\dot{\psi}_k$  являлась свободной, ее значение определялась из условия минимума квадрата ошибки отклонения робота от заданной точки. В [6] показано, что алгоритм ее назначения при решении задачи оптимального терминального управления

центра масс робота имеет вид:

$$\dot{\psi}_k = \begin{cases} -\frac{1}{t_k} \frac{180^\circ}{\pi}, & \text{если } \psi_k > \psi_0, \\ \frac{1}{t_k} \frac{180^\circ}{\pi}, & \text{если } \psi_k < \psi_0. \end{cases} \quad (3.6)$$

### 3.2. Задание параметров систем автоматического управления углом курса и входных воздействий

Передаточные функции электромашинного усилителя  $W_\psi(P)$ , электродвигателя  $W_\delta(P)$  и шасси  $W_w(P)$  имеют вид:

$$W_\psi(P) = \frac{1,5}{0,02P+1}, \quad W_\delta(P) = \frac{1}{0,2P+1}, \quad W_w(P) = \frac{1,5}{P+1}. \quad (3.7)$$

В программной системе (*рисунк 1.1*) заданы следующие коэффициенты подвижности  $a$  и коэффициенты инверсии  $K(a)$ :

$$a = 3, K(a) = \frac{1}{(\alpha-1)} = 0,5. \quad (3.8)$$

Для расчета угла курса  $\psi$  и конечного времени  $t_k$  использовались следующие выражения из кинематической модели [7]:

$$\psi_k = \arccos \frac{X_k}{\sqrt{X_k^2 + Z_k^2}}, \quad \psi_k \equiv \psi, \quad (3.9)$$

$$t_k = \frac{\sqrt{X_k^2 + Z_k^2}}{V}, \quad V = \text{const}. \quad (3.10)$$

Конечные координаты и скорость имели вид:

$$Z_k = 10\text{м}, \quad \dot{Z}_k = 10\text{м/с}, \quad V = 2\text{м/с}. \quad (3.11)$$

Для назначенных параметров получены значения:

$$\psi_{\text{зад}} = 33,68^\circ, \quad t_k = 9\text{с}. \quad (3.12)$$

Начальное значение координаты и начальное значение ее скорости заданы числами:

$$\psi_0 = -4^\circ, \quad \dot{\psi}_0 = 0,05 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (3.13)$$

С учетом (3.7) и малости постоянных времени электромашинного усилителя и двигателя, передаточная функция инвертора в канале терминального управления:

$$W_{\text{ин}}(P) = W_{\text{ин}}^{-1}(P) = \frac{P+1}{1,5} \approx \frac{P+1}{1,5(0,01P+1)}. \quad (3.14)$$

Для оптимальной терминальной САУ конечная скорость рассчитывалась в соответствии с выражением (3.6), поэтому:

$$\psi_k = 33,68^\circ, \quad \dot{\psi}_k = -7,9 \frac{\text{рад}}{\text{с}}, \quad t_k = 9\text{с}. \quad (3.15)$$

### 3.3. Исследование качества отработки заданных воздействий в программной и терминальной САУ

Графики зависимостей угла курса шасси РТК от времени  $\psi_w(t)$  для программной и оптимальной терминальной САУ приведены на *рисунке 3.2*.

Из анализа графиков (*рисунк 3.2*) следует,

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

что условия (3.12) для программной САУ углом курса выполняются, а терминальные условия (3.13) и (3.15) также выполняются после окончания времени управления.

Помимо графиков оптимальной терминальной САУ (которая работала все 9 с наведения) исследовались также и терминальная САУ углом курса, которая обрабатывала заданное значение угла курса за 3 с наведения при нулевой конечной скорости изменения угла курса.

Указанная терминальная САУ имеет лучший переходный процесс, чем программная система, что в дальнейшем отражается на повышении точности движения в конечной точке наведения.

Следует также отметить, что оптимальная терминальная САУ имеет лучший переходный процесс, чем программная и терминальная системы, так как в ней реализуется заданная оптимальная конечная скорость, что приводит к минимизации отклонения работы  $l$  от конечной заданной точки.

### 3.4. Исследование точности и качества управления движением робота при использовании САУ углом курса программного и терминального вида

Отличительной особенностью исследования движения робота на плоскости OXZ является использование его скорости движения  $V$ , что приводит к необходимости применения кинематической части схемы (интегрирующих звеньев, тригонометрических и суммирующих элементов) [7]. Для исследования вышеупомянутой точности необходимо использовать следующее выражения:

$$l(t) = l_s(\psi_k, V, t_k) - l_T(\psi, V, t), \quad (3.16)$$

где  $l(t)$  – отклонение текущей дальности  $l_T(\psi, V, t)$

от заданной  $l_s(\psi_k, V, t_k)$ . Графики зависимостей отклонений  $l(t)$  для программной и оптимальной терминальной САУ приведены на рисунке 3.3.

Следует также отметить, что оптимальное терминальное управление приводит к большей точности в конечной точке  $t=t_k=9$  с, чем терминальное управление. Это объясняется достижением лучшего качества переходного процесса по воспроизведению заданного угла курса при оптимальном терминальном управлении (см. графики на рисунке 3.2) и определением конечной угловой скорости угла курса из условия минимума отклонения  $l$  в момент  $t=t_k$ .

### Заключение

На основании вышеприведенных исследований, можно сделать следующие выводы:

1. Рассмотрены варианты управления углом курса РТК, на основе которых обоснована методика построения структурных схем замкнутых САУ углом курса роботов гусеничного типа.

2. Показаны особенности управления по углу курса гусеничным роботом, связанные с наличием коэффициента подвижности (таблица 2.1), для уменьшения влияния которого на устойчивость САУ рекомендовано производить нормировку коэффициента усиления разомкнутого канала системы.

3. Произведено исследование точности управления углом курса робота гусеничного типа и сравнение ее с точностью терминального управления из которого следует, что обе системы обрабатывают заданные значения угла курса, при этом САУ терминального типа имеет большее быстродействие по сравнению с программной системой.

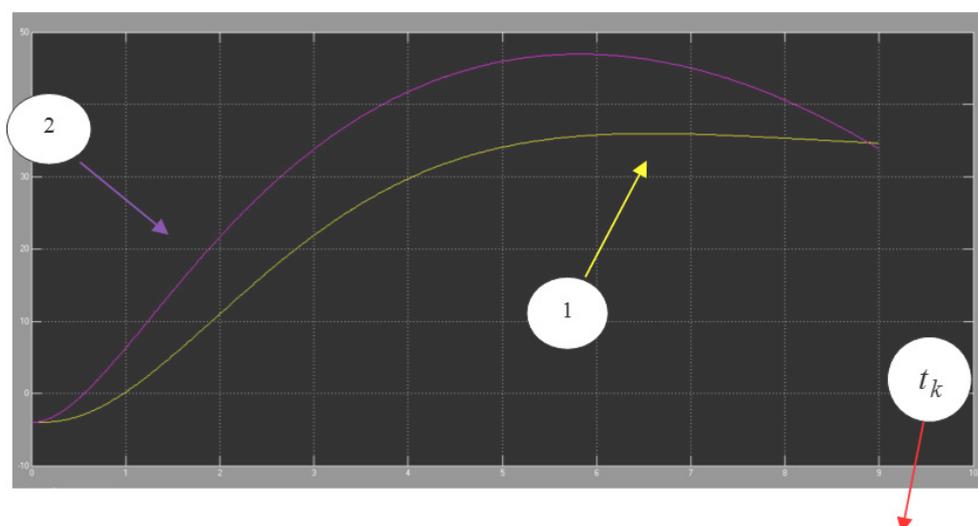


Рис. 3.2. Графики зависимостей угла курса  $\psi_{ш}(t)$ : 1 – программная САУ; 2 – оптимальная терминальная САУ

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

### Литература

1. Пушкарёв Ю.А. Свиридов В.В. Метод распознавания объектов на основе их сигнально-геометрических признаков средствами робототехнического комплекса охраны // Математическое моделирование и численные методы, 2022. Т.34. №9. С.88-106.
2. Сырых Н.В., Чашухин В.Г. Роботы вертикального перемещения с контактными устройствами на основе постоянных магнитов: конструкции и принципы управления контактными устройствами // Изв. РАН ТиСУ, 2019. №5. С.163-173.
3. Карташов В.А., Карташов В.В. Формирование траектории торможения манипулятором при неисправности привода // Изв. РАН ТиСУ, 2019. №5. С.155-162.
4. Richard C. Dorf, Robert H, Bishop. Modern Control Systems, Fourth Edition. ADDISON – WESLEY.800p, 1998.
5. Пушкарёв А.Ю., Пушкарёва Е.Ю. Системы автоматического управления в ракетно-космической технике. Задачи слежения и терминального управления // Монография. Серпухов: ФВА РВСН им. Петра Великого, 2020. 379 с.
6. Пискулин И.В. Предложения по способам рационального применения программных и терминальных САУ движением перспективных РТК ВН. Отчёт о НИР «ЩИТ-22». Серпухов: ФВА РВСН им. Петра Великого, 2022. 12 с.
7. Пушкарёва Е.Ю., Пискулин И.В. Кинематическая и динамическая модели систем автоматического управления движением робототехнического комплекса // Известия Института инженерной физики, 2022. №3(65), С.75-78.

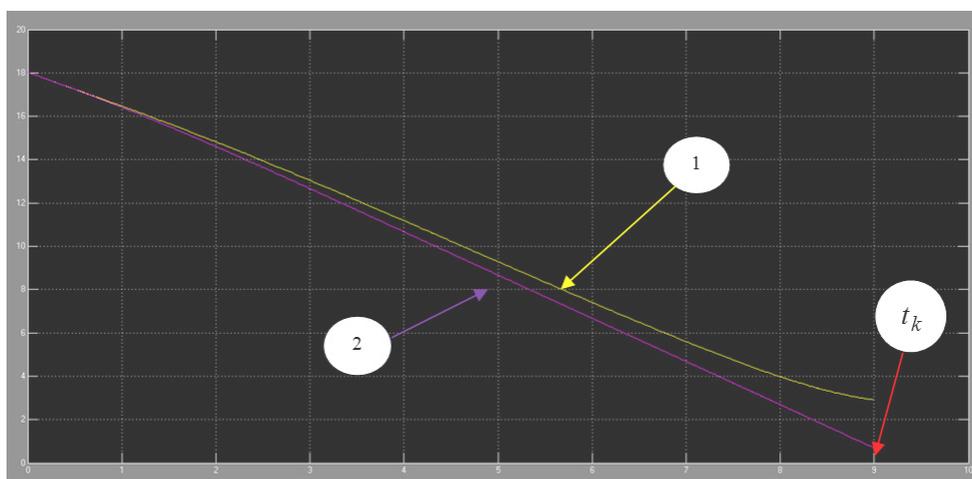
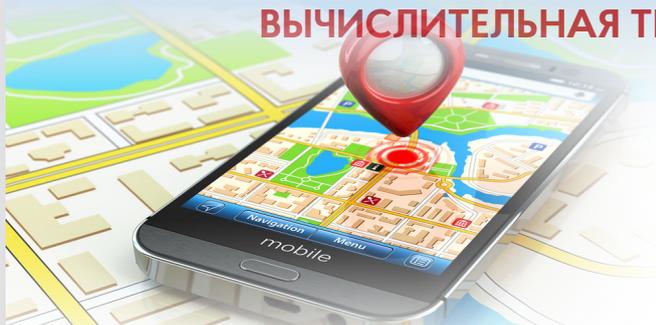


Рис. 3.3. Графики зависимостей отклонений  $l(t)$ : 1 – при программном управлении; 2 – при оптимальном терминальном управлении



# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ



УДК 681.5.23

## ПЕРЕКРЕСТКИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ КАК ИСТОЧНИК ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА

## CROSSROADS OF ROADS AS A SOURCE OF INFORMATION FOR CORRECTION OF THE NAVIGATION SYSTEM OF A MOVING OBJECT

**Александр Сергеевич Лычагов**  
кандидат технических наук  
доцент кафедры  
филиал ВА РВСН им. Петра Великого  
(г. Серпухов)  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17  
Тел.: 8 (985) 135-48-38  
E-mail: lichagov@rambler.ru

**Иван Михайлович Дружинин**  
кандидат технических наук  
доцент кафедры  
филиал ВА РВСН им. Петра Великого  
(г. Серпухов)  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17  
Тел.: 8 (496) 72-19-11

**Константин Владимирович Карпов**  
адъюнкт  
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

В статье рассматривается возможность привлечения перекрестков дорог для коррекции системы навигации подвижных наземных объектов. Исследованы автомобильные дороги ряда регионов с целью сопоставления реальных данных с предварительной оценкой. Проведена предварительная оценка достижимой точности на основе моделирования.

**Ключевые слова:** навигация, навигационная система счисления пути, характерная точка маршрута, перекресток дорог, цифровая карта дороги, система технического зрения.

### Summary

The article considers the possibilities of use crossroads to correct the navigation system of mobile terrain object. The highways of a number of regions were studied in order to compare real data with a preliminary assessment. A preliminary assessment of the achievable accuracy is carried out based on simulation of correction procedure.

**Keywords:** navigation, dead reckoning system, characteristic route point, road intersection, digital road map, vision system.

### Введение

Существо задачи навигации традиционно рассматривается как задача определения координат и ориентации объекта, а также иных параметров его движения. При этом, проведенные в России исследования [1,2], показывают, что в качестве основных потребителей навигационных систем (НС) стали выступать не морские и летательные объекты, а наземные подвижные объекты. Одной из причин переориентации может рассматриваться доступность спутниковых навигационных систем, а также развитие технологии беспилотных объектов. Последние кроме того предъявляют высокие требования к точности собственного позиционирования как в пространстве, так и относительно окружающих объектов.

Однако существуют специфические задачи и объекты, на применение которых могут накладываться

ограничения, в том числе и по использованию спутниковых сигналов. В подобных условиях актуальной задачей становится поиск методов совершенствования НС без применения внешних источников навигационной информации.

Одним из вариантов коррекции НС является привлечение информации об уникальных точках на траектории движения подвижного объекта, которые в области навигации получили название характерных или реперных точек [3,4]. Подобные точки должны обладать, по меньшей мере, двумя характеристиками:

1) точка должна иметь известное (строго определенное) положение в пространстве;

2) точка должна обладать уникальным свойством, отличающим ее от остальной совокупности данных, объектов и т.д.

В работе предлагается в качестве характер-

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ных точек использовать перекрестки дорог с улучшенным покрытием (асфальтированные дороги). Дорожное полотно является уникальным элементом по отношению к окружающей среде, а центр пересечения проезжих частей определяется координатами цифровой карты дорог (ЦКД). Таким образом, возможен вариант коррекции НС по информации ЦКД о перекрестке и фиксации факта его проезда.

В данной работе проводится оценка достижимого уровня точности работы НС при ее коррекции по информации о проезде перекрестков дорог.

### Особенности задачи оценивания точности НС по информации о проезде перекрестков

Упрощенно задачу оценивания НС по информации о проезде перекрестков можно представить следующим образом. Во время движения НС вырабатывает текущие значения координат объекта  $(x^И, y^И)$ , с дисперсией  $D_{xy}$ . Тогда, координаты объекта можно представить, как сумму их истинных значений  $xу_{ИСТ}$  и ошибки  $\Delta xу$

$$xу^И = xу_{ИСТ} + \Delta xу \quad (1)$$

При этом значение  $\Delta xу$  зависит от среднего квадратичного отклонения (СКО)  $\sigma_{xy0}$  значений координат в начальной точке, СКО  $\sigma_s$  датчика пройденного пути и СКО  $\sigma_a$  датчика курсового угла, которые можно представить в виде систем дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \Delta \dot{s} = V \\ \dot{y} = \frac{-1}{\tau_V} \cdot V + \sigma_V \cdot \sqrt{\frac{2}{\tau_V}} \cdot \frac{W_V}{\sqrt{dt}} \end{cases} \quad (2)$$

где  $\sigma_V, \tau_V$  – СКО измерения скорости движения и его период корреляции;

$W_V(t)$  – «белый» шум единичной интенсивности;

$$\begin{cases} \Delta \dot{\alpha} = \omega_G \\ \dot{\omega}_G = \frac{-1}{\tau_G} \cdot \omega_G + \sigma_{\omega_G} \cdot \sqrt{\frac{2}{\tau_G}} \cdot \frac{W_G}{\sqrt{dt}} \end{cases} \quad (3)$$

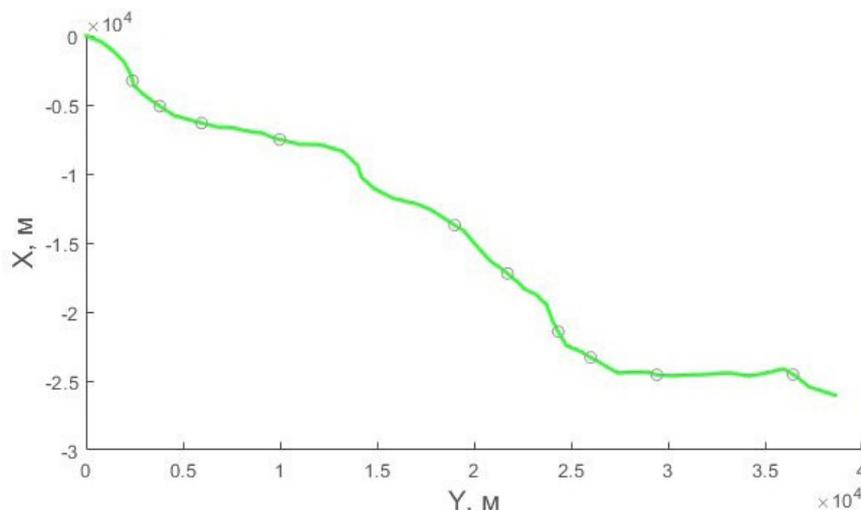


Рис. 1. Пример случайного маршрута движения (перекрестки отмечены кружком)

где  $\omega_G, \sigma_{\omega_G}, \tau_G$  – дрейф курсового гироскопа, СКО дрейфа курсового гироскопа и его период корреляции;

$W_G(t)$  – «белый» шум единичной интенсивности.

Предполагается, что объект движется по случайным маршрутам, в том числе и по дорогам, которые описаны в ЦКД в виде прямолинейных отрезков [5,6]. В результате появляется вероятность проезда перекрестков дорог, которые определяются координатами  $(x_K, y_K)$  с дисперсией  $D_K$ . Данные координаты можно представить аналогично навигационной системе

$$xу_K = xу_{ИСТ} + \Delta_K \quad (4)$$

Погрешность координаты перекрестка дорог в свою очередь может быть представлена следующим дифференциальным уравнением

$$\dot{\Delta}_K = \frac{-1}{\tau_K} \cdot \Delta_K + \sqrt{\frac{2 \cdot D_K}{\tau_K}} \cdot \frac{W_K}{\sqrt{dt}} \quad (5)$$

где  $\tau_K$  – период корреляции.

Признак проезда перекрестка может быть сформирован на основе анализа визуальной информации от системы технического зрения, которая может быть представлена видеокамерой и программным обеспечением, позволяющим распознавать перекресток дороги [7,8].

Таким образом, с одной стороны координаты объекта вырабатываются непосредственно навигационной системой, с другой известны в характерных точках маршрута движения (перекрестках дорог) – появляется принципиальная возможность определить ошибку текущих значений координат НС через разность координат ЦКД и НС объекта

$$xу^И - xу_K = \Delta xу + \Delta xу_K \quad (6)$$

В этом случае уравнение связи для параметров НС и ЦКД будет иметь вид:

$$r_i = H \cdot Z_i \quad (7)$$

где  $H$  – матрица наблюдения;

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

$Z_i$  – вектор состояния интегрированной НС на  $i$ -м шаге.

Искомая оценка координат интегрированной НС может быть найдена по известным соотношениям фильтра Калмана [9,10].

### Предварительная оценка точности коррекции НС по информации о прохождении перекрестков

Предварительные расчеты проводились путем имитационного моделирования интегрированной НС, характеризующейся следующими параметрами: СКО начальной точки маршрута  $\sigma_{xy0} = 10$  м, СКО начального дирекционного угла  $\sigma_{\alpha0} = 30$  угловых секунд, СКО измерения скорости  $\sigma_s = 0.001$  м/с, СКО дрейфа курсового гироскопа  $\sigma_{\omega G} = 0.01$  град/час, СКО ЦКД (перекрестка)  $\Delta_k = 2$  м. Маршрут движения протяженностью 50 и 100 км, со случайно при каждом запуске и равномерно распределенными перекрестками (рисунк 1).

Потенциально достижимая точность выработки координат НС определялась как для конечной точки маршрута (рисунк 2, синяя прямая), так и для всего маршрута движения (рисунк 2, красная прямая) при среднем расстоянии между перекрестками от 2500 до 20000 м с шагом в 2500 м и 100 случайных реализаций маршрута движения. Пример коррекции НС по информации о проезде перекрестков представлен графиком (рисунк 3) зависимости СКО координат от пройденного пути при среднем расстоянии между перекрестками 5000 м для 10 реализаций маршрута движения. Из графиков (рисунк 2) видно:

- средняя точность коррекции НС на марш-

рute несколько хуже, чем в конечной точке;

- существует принципиальная возможность достижения точности определения координат на уровне единиц метров;

- начальное значение СКО (10 м) для конечной точки маршрута обеспечивается при конфигурациях маршрутов со средним расстоянием между перекрестками не более 17000 м, для всего маршрута – не более 11000 м.

### Анализ дорожной сети

Распределение перекрестков на существующих дорогах естественно отличается от моделируемого. С целью определения среднего расстояния между перекрестками и факторами, влияющими на их распределение, проведено исследование реальной дорожной сети. Исследование проводилось путем изучения электронных карт ряда регионов Российской Федерации, находящихся в открытом доступе [11]. Анализ строился на рассмотрении не конфигурации случайно сформированных маршрутов, а на рассмотрении сети асфальтированных дорог, в основном муниципального значения, общей протяженностью не менее 1000 км для каждого региона. При этом участки дорог, проходящие через населенные пункты, за исключением малых населенных пунктов сельского типа, не рассматривались.

Расстояние между перекрестками рассмотренных дорожных сетей колеблется от 100 м и до практически 50 км. Наибольший интерес представляет среднее расстояние между перекрестками, которое для рассмотренных регионов находится в диапазоне от 3,5 до 4 км.

Количественно по расстоянию между перекрестками распределение представлено на диа-

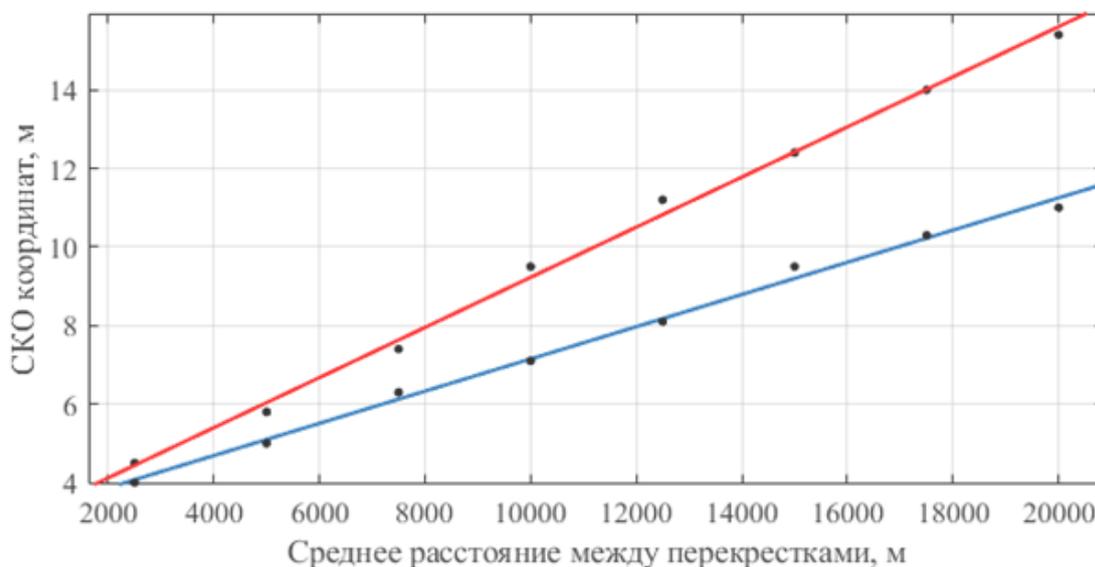


Рис. 2. Зависимость СКО определения координат от среднего расстояния между перекрестками

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

граммах как на отдельный регион – Северный (рисунк 4), так и общим распределением по всем рассмотренным регионам (рисунк 5). Из диаграмм видно, что более 50% перекрестков располагаются на расстоянии друг от друга не более 2500 м, а на перекрестки удаленные друг от друга на расстояние более 10000 м приходится всего около 10%.

Основным фактором, определившим частоту встречи перекрестков, стало наличие населенных пунктов, их плотность. Несмотря на то, что перекрестки в самих населенных пунктах не учитывались, приближение к любому городу или поселку неотъемлемо связано с нарастанием их количества. Это связано с наличием съездов с объездных дорог, учащением дорожных развязок, появлением второстепенных дорог к промышленным и складским зонам и т.д. При этом в слабо заселенных регионах, таких как

Архангельская и Мурманская области, уменьшение плотности населенных пунктов и соответственно асфальтированных дорог связано с особенностями регионов, их труднопроходимостью. Поэтому и улучшенные грунтовые дороги в подобных регионах встречаются не часто. Однако не только сложные климатические условия могут определять наличие и расстояние между перекрестками. Исследование показало, что развитость сельского хозяйства, также приводит к подобному результату. Так в Ставропольском крае перекрестков удаленных друг от друга на расстояние более 10000 м оказалось столько же сколько в Саратовской области и республике Татарстан вместе взятых.

### Заключение

Таким образом, на основе результатов моделирования и анализа реальной сети автомо-

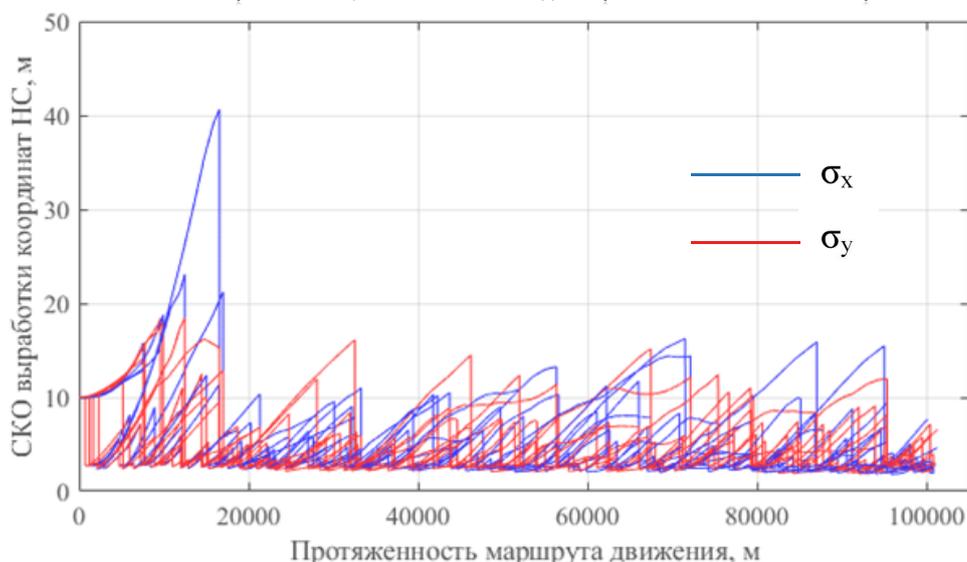


Рис. 3. График зависимости СКО определения координат от пройденного пути при среднем расстоянии между перекрестками 5000 м



Рис. 4. Распределение перекрестков для Северного региона

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ



**Рис. 5.** Распределение перекрестков по всем рассмотренным регионам

бильных дорог, можно сделать следующий вывод: существует принципиальная возможность достижения точности определения координат НС как в конечной точке маршрута, так и на маршруте движения на уровне единиц метров путем коррекции навигационных параметров по информации о прохождении перекрестков при движении объекта по асфальтированным автомобильным дорогам и точной ЦКД.

### Литература

1. Исследование состояния и перспектив развития навигационных, связанных и навигационно-связанных модулей, оценка влияния на развитие российского и международного рынка «Автонет» (аналитический отчет) / Ассоциация разработчиков, производителей и потребителей оборудования и приложений на основе глобальных навигационных спутниковых систем «ГЛОНАСС / ГНСС-Форум». М.: 2019. 236 с.
2. Навигационный рынок [Электронный ресурс] / ГЛОНАСС – НП ГЛОНАСС. Некоммерческое партнерство «Содействие развитию и использованию навигационных технологий». Режим доступа <https://glonassunion.ru/navigation-market.html>. Дата обращения 14.12.2021.
3. Устинов В.В. Методика выбора цифровой карты для коррекции системы наземной навигации по характерным точкам автомобильных дорог // Известия Института инженерной физики, 2021. №1(59). С.73-86.
4. Беркович С.Б. Оценка эффективности использования геопространственных данных в задаче автономного определения координат наземной навигационной системой / С.Б. Беркович, Р.Р. Бикмаев, Н.И. Котов, А.И. Шахов, В.В. Устинов, А.В. Шолохов // Известия Института инженер-

ной физики, 2021. №2(60).С.2-10.

5. Дмитриев С.П. Оптимальное решение задачи автомобильной навигации с использованием карты дорог / С.П. Дмитриев, О.А. Степанов, Б.С. Ривкин, Д.А. Кошаев, Д.Чанг // Гироскопия и навигация, 2000. №2(29). С.57-69.
6. Шолохов А.В. Обоснование допусков в задачах комплексной обработки информации автомобильных навигационных систем и цифровых карт дорог / Р.Н. Садеков, А.В. Шолохов // Известия Института инженерной физики, 2014. №2(32). С.61-65.
7. Лычагов А.С. Опыт создания и применения систем технического зрения для навигации наземных подвижных объектов / К.А. Асатрян, А.Г. Букин, А.С. Лычагов, Р.Н. Садеков // 7-я российская мультikonференция по проблемам управления: материалы XXIX конференции памяти Н.Н. Острякова, Санкт-Петербург, Россия, 7-9 окт. 2014, 2014. С.226-231.
8. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. М.: Техносфера, 2012. 1104 с.
9. Степанов О.А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч.2. Введение в теорию фильтрации. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2012. 417 с.
10. Степанов О.А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч.1. Введение в теорию оценивания. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2010. 509 с.
11. АО КБ «Панорама» [Электронный ресурс] / Бесплатные карты на основе данных OpenStreetMap. Режим доступа [https://gisinfo.ru/price/price\\_map.htm](https://gisinfo.ru/price/price_map.htm). Дата обращения 11.02.2022.

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 621.391

## ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК ИНСТРУМЕНТ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПЕРЕХВАТА ПЕРЕИЗЛУЧЕННЫХ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ, МОДУЛИРОВАННЫХ ИНФОРМАТИВНЫМИ АКУСТИЧЕСКИМИ СИГНАЛАМИ

### FUNCTIONAL MODELING AS A TOOL FOR FORMALIZING THE PROCESS OF INTERCEPTION OF RE-EMITTED HIGH- FREQUENCY SIGNALS MODULATED BY INFORMATIVE ACOUSTIC SIGNALS

**Сергей Васильевич Скрыль**  
*доктор технических наук, профессор*  
профессор  
МГТУ им. Н.Э. Баумана  
Адрес: 105005, Москва,  
ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1  
Тел.: +7 (960) 125-51-05  
E-mail: karel105@mail.ru

**Сергей Сергеевич Никулин**  
аспирант  
МГТУ им. Н.Э. Баумана  
Адрес: 105005, Москва,  
ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1

**Анатолий Викторович Мазин**  
*доктор технических наук, профессор*  
заведующий кафедрой «Защита  
информации»  
Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана  
Адрес: 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2  
Тел.: 8 (910) 915-58-25  
E-mail: mazinav@yandex.ru

**Артём Михайлович Сычёв**  
*доктор технических наук*  
доцент  
МГТУ им. Н.Э. Баумана  
Адрес: 105005, Москва,  
ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1

**Александр Иванович Бороненков**  
*кандидат технических наук*  
Воронежский институт МВД РФ  
Адрес: 394065, г. Воронеж,  
проспект Патриотов, д. 53  
Тел.: 8 (473) 247-67-07

#### Аннотация

Данная статья является продолжением серии опубликованных в предыдущих номерах журнала статей, посвященных функциональному представлению действий по перехвату информативных сигналов по параметрическим каналам. В ней описывается функциональная модель третьего этапа такого рода действий – этапа перехвата переизлученных высокочастотных сигналов (ВЧ-сигналов), модулированных информативными акустическими сигналами во вспомогательных технических средствах и системах (ВТСС) объекта разведки. Приводится процедура функциональной структуризации данного этапа до уровня признаков выполняемых нарушителем процедур.

**Ключевые слова:** функциональное моделирование, утечка информации по параметрическим каналам, перехват переизлученных ВЧ-сигналов, модулированных информативными акустическими сигналами в ВТСС объекта разведки.

#### Summary

This article is a continuation of a series of articles published in previous issues of the journal devoted to the functional representation of actions to intercept informative signals by parametric channels. It describes a functional model of the third stage of such actions – the stage of interception of re-emitted high-frequency signals (RF signals) modulated by informative acoustic signals in auxiliary technical means and systems (VTSS) the object of exploration. The procedure of functional structuring of this stage to the level of signs of the procedures performed by the violator is given.

**Keywords:** functional modeling, information leakage through parametric channels, interception of re-emitted RF signals modulated by informative acoustic signals in the HTSS of a reconnaissance object.

Одним из серьезных факторов снижения эффективности информационной деятельности является уязвимость к различного рода угрозам безопасности информации [1]. При этом, исходя

из природы информационного обмена [2], одной из наиболее серьезных угроз безопасности информации является ее утечка через естественные физические среды [3].

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

В этой связи следует отметить, что вспомогательные технические средства и системы (ВТСС), используемые в процессе информационной деятельности, являются источниками информативных электрических сигналов, возникающих при изменении параметров технических средств (узлов), входящих в их состав [4]. Существующая классификация технических каналов утечки информации определяет перехват электромагнитных излучений (ЭМИ), возникающих за счет изменения параметров устройств ВТСС объекта разведки под действием информативного сигнала на элементную базу этих устройств, как параметрический канал [5].

Параметрические каналы утечки информации представляют существенную опасность вследствие сложности их обнаружения, обусловленной требованием проведения специальных мероприятий по оценке всех тех обстоятельств, которые дают основание рассматривать технические средства (узлы, элементы и т.д.) в качестве источника такого рода угроз безопасности информации.

Это обуславливает необходимость детального исследования подобного рода угроз безопасности информации с целью научного обоснования функциональных характеристик применяемых способов и средств ее защиты информации. В соответствии с основополагающими положениями системного анализа в данной предметной

области [6] практически безальтернативным инструментом исследования указанных вопросов является математическое моделирование.

Одним из наиболее распространенных инструментов формализации исследуемых процессов с целью разработки математических моделей их функциональных характеристик является методологический аппарат функционального моделирования [7-9]. Рассмотренные в [10,11] функциональные модели действий нарушителя по перехвату информативных сигналов по параметрическим каналам описывают первый и второй этапы представленной в [12] обобщенной функциональной модели такого рода угроз безопасности информации (рисунки 1).

Назначение третьего этапа такого рода действий состоит в выполнении одной из важнейшей составляющей реализуемой нарушителем целевой функции – перехват переизлученных высокочастотных сигналов (ВЧ-сигналов), модулированных информативными акустическими сигналами во вспомогательных технических средствах и системах (ВТСС) объекта разведки. Формализованное представление этого этапа имеет важное значение для оценки с помощью математических моделей возможностей нарушителя по реализации своих действий. С этой целью воспользуемся предложенным в [10-12] методологическим подходом для представления

### Перехват информации по параметрическим каналам

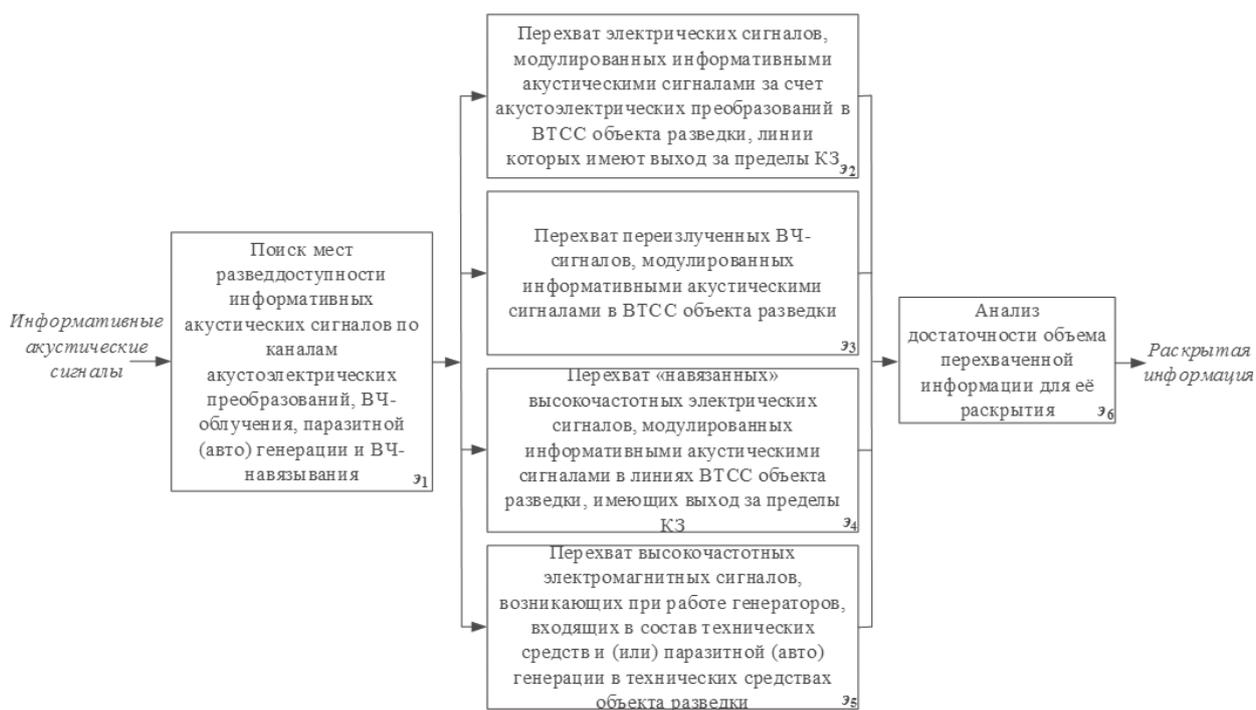


Рис. 1. Функциональная диаграмма декомпозиционного представления целевой функции действий нарушителя по перехвату информации по параметрическим каналам техническими средствами разведки

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

функциональной модели данного этапа. При этом воспользуемся и предложенной в этих источниках терминологией, и обозначениями.

Представим этап  $\varepsilon_3$  реализации целевой функции  $F$  «Перехват информативных сигналов по параметрическим каналам», как результат выполнения следующих режимов работы соответствующих технических средств разведки (ТСР) [13-15] (рис. 2):

$p_{31}$  – перехват переизлученных ВЧ-сигналов, модулированных информативными акустическими сигналами в ВТСС объекта разведки с помощью аппаратуры ведения акустической разведки (АР) по каналу ВЧ-облучения;

$p_{32}$  – повышение разборчивости перехваченных информативных акустических сигналов специальными программными (программно-аппаратными) методами.

Каждый из перечисленных режимов представляется совокупностью процедур.

Режим  $p_{31}$  – перехват переизлученных ВЧ-сигналов, модулированных информативными акустическими сигналами в ВТСС объекта разведки с помощью аппаратуры ведения АР по ка-

налу ВЧ-облучения составляют следующие процедуры (рис. 3):

$n_{311}$  – перехват переизлученных ВТСС объекта разведки электромагнитных сигналов, модулированных информативными акустическими сигналами на несущих частотах, ранее зафиксированных в базе разведопасных сигналов;

$n_{312}$  – преобразование перехваченных переизлученных ВТСС объекта разведки электромагнитных сигналов в информативные акустические сигналы.

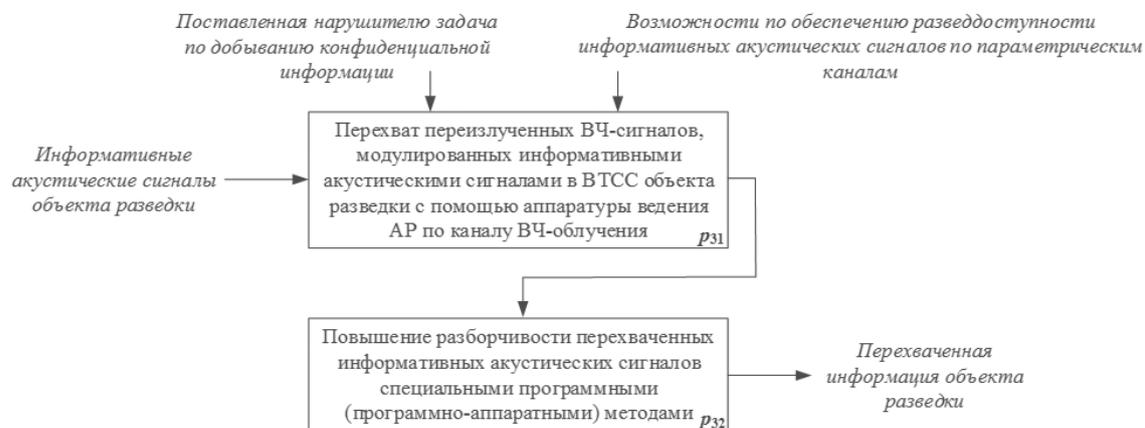
Режим  $p_{32}$  – повышение разборчивости перехваченных информативных акустических сигналов специальными программными (программно-аппаратными) методами составляют следующие процедуры (рис. 4):

$n_{321}$  – шумоочистка информативных акустических сигналов, перехваченных по каналу ВЧ-облучения, методами адаптивной фильтрации;

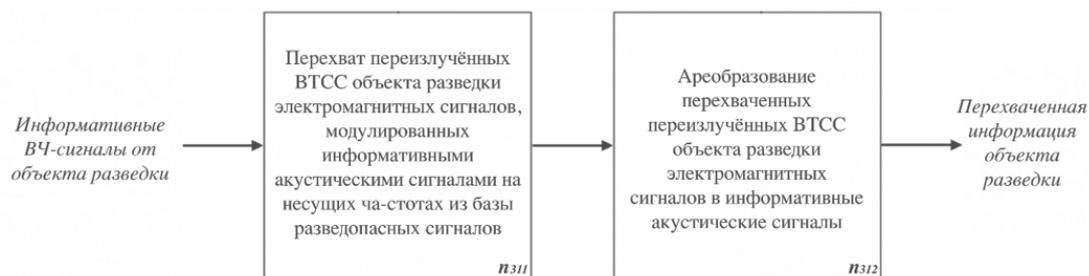
$n_{322}$  – повышение разборчивости сигналов, перехваченных по каналу ВЧ-облучения, методами компенсации искажений;

$n_{323}$  – повышение разборчивости сигналов, перехваченных по каналу ВЧ-облучения, ме-

### Перехват переизлученных ВЧ-сигналов, модулированных информативными акустическими сигналами в ВТСС объекта разведки



**Рис. 2.** Функциональная диаграмма этапа перехвата переизлученных ВЧ-сигналов, модулированных информативными акустическими сигналами в ВТСС объекта разведки



**Рис. 3.** Функциональная диаграмма режима перехвата переизлученных ВЧ-сигналов, модулированных информативными акустическими сигналами в ВТСС объекта разведки с помощью аппаратуры ведения АР по каналу ВЧ-облучения

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

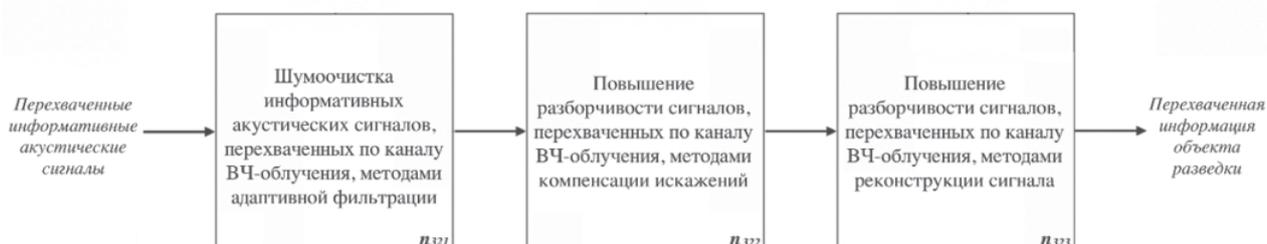
тодами реконструкции сигнала.

Каждая из рассмотренных процедур перехвата переизлученных ВЧ-сигналов, модулированных информативными акустическими сигналами представляется соответствующим признаком ее выполнения (таблица 1). При этом индексация признаков в соответствующей колонке таблицы приводится с учетом того, что они дополняют сформированные в [10,11] множества этих признаков.

Сформированная функциональная модель действий нарушителя по перехвату переизлученных ВЧ-сигналов, модулированных информативными акустическими сигналами, следует

рассматривать как предпосылку для разработки математических моделей характеристик мер защиты от такого рода угрозы безопасности информации [16].

Функциональную модель этапа перехвата «навязанных» высокочастотных электрических сигналов, модулированных информативными акустическими сигналами в линиях ВТСС объекта разведки, имеющих выход за пределы контролируемой зоны (следующего, четвертого этапа реализации целевой функции «Перехват информативных сигналов по параметрическим каналам») будет рассмотрена в следующей статье данной серии.



**Рис. 4.** Функциональная диаграмма режима повышения разборчивости перехваченных информативных акустических сигналов специальными программными (программно-аппаратными) методами

**Таблица 1**

п/п	Наименование процедуры	Обозначение процедуры	Обозначение признака	Характеристика признака
1	Перехват переизлученных ВТСС объекта разведки электромагнитных сигналов, модулированных информативными акустическими сигналами на несущих частотах из базы разведопасных сигналов	$P_{311}$	$\alpha_{311}$	Действия нарушителя по перестройке генератора облучающего ВЧ-сигнала и приемника переизлученного сигнала, модулированного информативными акустическими сигналами, на частотах из базы разведопасных сигналов
2	Преобразование перехваченных переизлученных ВТСС объекта разведки электромагнитных сигналов в информативные акустические сигналы	$P_{312}$	$\alpha_{312}$	Демодуляция информативных акустических сигналов из перехваченных переизлученных ВТСС объекта разведки электромагнитных сигналов
3	Шумоочистка информативных акустических сигналов, перехваченных по каналу ВЧ-облучения, методами адаптивной фильтрации	$P_{321}$	$\alpha_{321}$	Действия нарушителя по очистке перехваченных информативных акустических сигналов от посторонних шумов с помощью специальных программных и программно-аппаратных средств
4	Повышение разборчивости сигналов, перехваченных по каналу ВЧ-облучения, методами компенсации искажений	$P_{322}$	$\alpha_{322}$	Действия нарушителя по очистке перехваченных информативных акустических сигналов от посторонних шумов с помощью специальных программных и программно-аппаратных средств
5	Повышение разборчивости сигналов, перехваченных по каналу ВЧ-облучения, методами реконструкции сигнала	$P_{323}$	$\alpha_{323}$	Действия нарушителя по очистке перехваченных информативных акустических сигналов от посторонних шумов с помощью специальных программных и программно-аппаратных средств

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

### Литература

1. Информатика: учебник для высших учебных заведений МВД России. Т.1. Информатика: Концептуальные основы / С.В. Скрыль, Н.С. Хохлов [и др.]. М.: Маросейка, 2008. 464 с.
2. Теория информации: учеб. пособие для студ. учреждений высш. образования / А.И. Куприянов [и др.]; под ред. С.В. Скрыля. М.: Издательский центр «Академия», 2021. 240 с.
3. Технические средства и методы защиты информации: учебник для студентов высших учебных заведений / А.А. Шелупанов, Р.В. Мещеряков, С.В. Скрыль [и др.]. М.: Машиностроение, 2008. 508 с.
4. Хорев А.А. Техническая защита информации: учебное пособие для студентов вузов. Т.1. Технические каналы утечки информации / под ред. Ю.Н. Лаврухина. М.: НПЦ «Аналитика», 2008. 436 с.
5. Меньшаков Ю.К. Теоретические основы технических разведок: учебное пособие / под ред. Ю.Н. Лаврухина. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 536 с.
6. Скрыль С.В., Шелупанов А.А. Основы системного анализа в защите информации: учебное пособие для студентов высших учебных заведений. М.: Машиностроение, 2008. 138 с.
7. Калянов Г.Н. CASE: Структурный системный анализ (автоматизация и применение). М.: Лори, 1996. 242 с.
8. Функциональное моделирование как методология исследования конфиденциальности информационной деятельности / С.В. Скрыль [и др.] // Интеллектуальные системы (INTELS' 2010): Труды Девятого международного симпозиума. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. С.590-593.
9. Скрыль С.В., Авсентьев А.О. Функциональность как показатель эффективности деятельности по технической защите информации // Охрана, безопасность и связь – 2011: Материалы Международной научно-практ. конф. Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2011. Ч.1. С.4-7.
10. Процесс поиска мест разведдоступности параметрических каналов утечки информации как объект функционального моделирования / М.П. Сычев, А.В. Мазин, А.М. Сычев, В.О. Крылов [и др.] // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. М.: «Научтехлитиздат», 2022. №3. С.31-39.
11. Функциональная модель процесса перехвата электрических сигналов, модулированных информативными акустическими сигналами за счет акустоэлектрических преобразований в радиоэлектронных устройствах объекта разведки / М.П. Сычев, В.О. Крылов [и др.] // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. М.: «Научтехлитиздат», 2022. №6. С.33-37.
12. Функциональные аспекты моделирования процесса перехвата информативных сигналов по параметрическим каналам / М.П. Сычев, А.В. Мазин, В.О. Крылов [и др.] // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. М.: «Научтехлитиздат», 2022. №2. С.22-33.
13. Меньшаков Ю.К. Виды и средства иностранных технических разведок: учебник / под ред. М.П. Сычева. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 656 с.
14. Меньшаков Ю.К. Теоретические основы технических разведок: уч. пособие. М.: ИПЦ «Маска», 2017. 638 с.
15. Техническая защита информации: учеб. пособие для студ. учреждений высш. образования / С.В. Скрыль, А.И. Куприянов, А.М. Сычев, В.О. Крылов [и др.]; под ред. С.В. Скрыля. М.: Издательский центр «Академия», 2021. 240 с.
16. Математическое моделирование процессов предотвращения утечки информации по параметрическим каналам в процессе управленческой деятельности / С.В. Скрыль, А.В. Мазин, Т.В. Мещерякова, В.О. Крылов [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. М: АО «ЦНИИ экономики, систем управления и информации «Электроника», 2021. Т.50. №4. С.39-48.

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 539.182

## НАРУШЕНИЕ НЕРАВЕНСТВ БЕЛЛА В КВАНТОВОЙ ФИЗИКЕ НИЗКИХ И ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

## VIOLATION OF BELL'S INEQUALITIES IN QUANTUM PHYSICS AT LOW AND HIGH ENERGIES

**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

**Сергей Николаевич Столбов**

генеральный директор  
ООО «Протиус»  
Адрес: 124460, Москва, г. Зеленоград,  
площадь Шокина, д. 2, строение 4  
Тел.: +7 (906) 042-95-89  
E-mail: stolbovsn@mail.ru

**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

### Аннотация

В данной работе анализируется нарушение неравенства Белла с устранением лазеек, как в области низких энергий, так и в области высоких энергий. К области низкой энергии мы относим подобные эксперименты в атомной физике, в частности, в NV-центрах. К области высоких энергий мы относим достижения и поиски перспектив экспериментов с массивными кварками, векторных W-бозонов и уникального Хиггсовского скалярного бозона. Изучение нарушения неравенства Белла в области высоких энергий нас интересует в связи с поиском концептуальных особенностей новой физики за пределами квантовой физики, которые мы ожидаем при сверхвысоких энергиях.

**Ключевые слова:** классическая физика, квантовая физика, неравенство Белла, квантовая запутанность, сепарабельность, локальный реализм.

### Summary

In this paper, we analyze the violation of Bell's inequality with the elimination of loopholes, both in the low-energy region and in the high-energy region. We refer similar experiments in atomic physics, in particular, in NV centers, to the low energy region. In the high-energy area, we include the achievements and searches for the prospects of experiments with massive quarks, vector W-bosons, and the unique Higgs scalar boson. We are interested in studying the violation of Bell's inequality in the high-energy region in connection with the search for conceptual features of new physics outside of quantum physics, which we expect at superhigh energies.

**Keywords:** classical physics, quantum physics, Bell's inequality, quantum entanglement, separability, local realism.

*В определенной экспериментальной ситуации  
все локальные реалистические теории  
несовместимы с квантовой механикой.*

Дж. С. Белл

### Введение. 100 лет квантовой физике и ее будущее

За 100 лет квантовая физика шагнула от нерелятивистской квантовой механики до теории квантовых полей, на базе которых создана еди-

ная теория электрослабых взаимодействий и квантовой хромодинамики, от квантования атома водорода и всей периодической таблицы Менделеева до квантования протона и нейтрона. От теории электромагнитного вакуума до открытия уникального Хиггсовского вакуума, который ответственен за образование массы вещества. На ее базе создана теория квантовой информации. На базе уникальных явлений квантовой запутанности создается новое поколение квантовых

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

компьютеров и квантовой телепортации.

Несмотря на мощный прогресс, квантовая физика содержит в себе необычные фундаментальные положения, вызывающие интеллектуальные трудности ее естественного восприятия, требующие постоянного экспериментального сопровождения для проверки корректности этой теории, в частности, нарушений неравенства Белла, как ее отличительного признака от классической физики.

Сейчас мир стоит на пороге создания абсолютно новой физической науки за порогом квантовой физики [1], которая в своей философской основе до сих пор содержит вопросы необычайно трудные для сознания, воспитанного на естественных законах классической физики.

Запутанность или неразделимость квантовых состояний, является характерной чертой квантовой физики, которая приводит к взаимной зависимости результатов измерения локальных наблюдаемых по отношению к составляющим. Эта неклассическая корреляция, присущая запутанности, это то, что использовали ЭПР [2] чтобы допустить неполноту квантовой механики как физической теории, в тоже время именно эта корреляция теперь рассматривается как ключевой ресурс огромного класса стратегических исследований и применений в квантовой науке информации.

Запутанность экспериментально подтверждается обнаружением нарушения неравенства Белла [2], которое имеет место пока природой правит локальный реализм, принцип глубоко укоренившийся в научной мысли до появления квантовой механики. Таким образом, испытание неравенства Белла, или критерии Белла явились важным предметом исследования в фундаментальной физике с тех пор, как неравенство было переформулировано в форму, удобную для эксперимента [3]. Действительно, за последние четыре десятилетия было проведено множество экспериментов с запутанными частицами-состояниями при различных условиях и энергиях, в которых сообщалось о нарушении в различных системах: фотонах, ионах, нуклонах, сверхпроводящих фазовых кубитах, NV-центрах в алмазе [4]. Важно подчеркнуть, что предсказания квантовой механики для запутанных частиц нарушают неравенства типа Белла-CHSH, которые ожидаются и в квантовой теории, связанной с физическими процессами при высоких энергиях, например, в В-мезонах в эксперименте Belle КЕК [5]. Однако они несовместимы с «реалистическими» теориями, включая классическую физику, в которых свойства систем не зависят от нашего наблюдения за ними.

Кроме низкоэнергетических систем были также сделаны предложения проверить неравенства Белла в  $e+e-$ -столкновениях. Совсем недавно было предложено провести такие тесты в запутанных  $t+t^*$  распадах и в системах мезонов  $V^0+V^{*0}$ , включая распады скаляра  $H \rightarrow WW^+$  на пару различных массивных бозонов со спином 1 в максимально запутанном состоянии на Большом Адронном Коллайдере LHC(ЦЕРН) [6,7,8]. Распады  $W$  бозонов максимально нарушают киральность, так распад бозона  $W^+$  преимущественно испускает заряженный лептон вдоль направления спина  $W^+$ , в то время как распад бозона  $W^-$  преимущественно испускает заряженный лептон, движущийся против направления его спина. Каждый распад  $W$ -бозона вызывает измерение спина вдоль оси испущенного лептона, что приводит к корреляциям в азимутальных направлениях испускаемых лептонов  $\{e^\pm, \mu^\pm\}$ , которые использовались коллаборациями ATLAS и CMS для отделения распадов Хиггса от фонов  $W^+W^-$  при поиске бозона Хиггса [6,7,8]. Поэтому в будущем можно использовать эти  $H \rightarrow W^+W^-$  бозонные распады в качестве лаборатории для проверки неравенств Белла. Они открывают возможность проверить неравенства Белла в новом режиме: при энергиях порядка  $m_H \approx 125$  ГэВ, масштабах времени порядка  $\approx 10^{-25}$  с и масштабах длин порядка  $\approx 10^{-14}$  см. Эти шкалы на много порядков удалены от существующих экспериментальных результатов и предлагают перспективу проведения тестов Белла в новом режиме глубоко в области квантовой теории поля.

### 1. Неравенство Белла. Неопределенность и локальность

Принцип неопределенности Гейзенберга отражает тот факт, что измерения квантовых систем возмущают измеряемую систему. Этот фундаментальный закон физики указывает на то, что результаты наблюдаемых экспериментов, имеют минимальный уровень неопределенности, который невозможно устранить с помощью теоретической модели. Так, если две наблюдаемые квантовой частицы,  $A$  и  $B$ , например, положение и импульс электрона и  $\Delta(A)$  и  $\Delta(B)$  стандартные отклонения измерений  $A$  и  $B$ , то принцип неопределенности Гейзенберга гласит, что

$$\Delta(A) \times \Delta(B) \geq \hbar/2 | \langle \psi | [A,B] | \psi \rangle |. \quad (1)$$

Неопределенность является фундаментальным свойством квантовых систем. Для квантовых систем однажды измеренное положение частицы дает определенное распределение ее импульса, и этот наблюдаемая импульс не может быть точно определен в этот момент, независи-

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

мо от нашей изобретательности.

Эйнштейн и его сторонники долгое время спорили с Бором, Гейзенбергом, Шредингером, Дираком и другими сторонниками копенгагенской доктрины о том, что недетерминизм никак не может быть основой законов природы. Эйнштейн считал, что неполнота квантовой теории обусловлена наличием в ней некоторых «скрытых переменных», и если бы можно было обнаружить значения этих переменных, то случайность исчезнет.

Было принято считать, что существуют три фундаментальных принципа для теории, пытающейся точно описать природу [9]: (i) детерминистский взгляд, позволяющий определять переменные с большой точностью, как это подтверждается теорией Ньютона. Вероятности приемлемы для описания результатов экспериментов, но только при особых условиях, например, когда граничное условие ограничивает нашу способность получить полное описание реальности; (ii) локальность, тот факт, что системы, находящиеся далеко друг от друга в пространстве, могут влиять друг на друга только путем обмена сигналами с учетом ограничений, вызванных конечной скоростью света; (iii) полнота, включение элементов реальности, таких как положение и импульс частицы.

На Сольвеевских конференциях Эйнштейн регулярно пытался проиллюстрировать ошибочность принципа неопределенности Гейзенберга с помощью так называемых «мысленных» экспериментов [9]. Идея одного такого эксперимента состоит в том, чтобы иметь две частицы, связанные друг с другом, измерить одну и собрать знания о другой. Рассмотрим две частицы «А» и «В» с известным импульсом, летящие навстречу друг другу и взаимодействующие друг с другом в известном положении в течение очень короткого периода времени. Наблюдатель, далекий от места, где две частицы взаимодействовали друг с другом, измеряет импульс частицы «А» и на основе этого измерения может определить импульс частицы «В». Наблюдатель может выбрать измерение положения частицы «А» вместо его импульса. Согласно принципам квантовой механики, это было бы совершенно законное предложение, но вопиющее нарушение здравого смысла. Как окончательное состояние частицы «В» может повлиять на измерение, выполненное на частице «А» спустя долгое время после того, как физическое взаимодействие между двумя частицами прекратилось? Эксперимент авторов ЭПР заключается в том, что положение и импульс одной частицы определяется именно измерениями, выполненными на

ее «запутанном близнеце». Авторы ЭПР пишут: «Если, не нарушая систему, можно с уверенностью (т. е. с вероятностью единица) предсказать значение физической величины, то есть элемент физической реальности, соответствующий этой физической величине». Они пришли к выводу, что, хотя положение и импульс «запутанного близнеца» являются элементами физической реальности и так как квантовая механика не позволяет обеим быть частью описания состояния частицы, квантовая механика является неполной теорией.

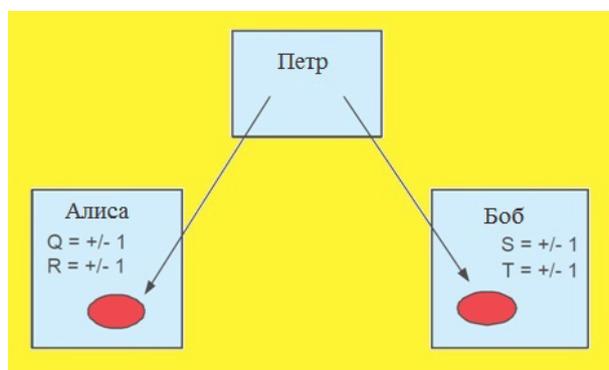
### 2. Неравенство Белла о локальном реализме теорий

Для разрешения столь затянувшегося спора Белл предложил эксперимент, который приводит к классическому неравенству. Этот новый эксперимент не предполагает никаких ссылок на квантовую механику и базируется на единственных здравых интуитивных предположениях: реальности и локальности [2-9]:

(а) Реализм – физические свойства, не зависящие от наблюдений.

(б) Локальность – измерения различных физических свойств различных объектов, проводимые разными людьми, которые находятся в разных местах и не могут влиять друг на друга.

Предположим, что Петр готовит две частицы и отправляет одну из них Алисе, а другую Бобу, см. рисунок 1. Алиса может измерить два физических свойства своей частицы, Q и R. Результатами этих измерений являются значения двух физических свойств, Q и R соответственно. Вводим условие что, результаты измерений могут быть только  $Q, R = \pm 1$ . Точно так же Боб может измерить два физических свойства своей частицы S и T. Результаты этих измерений могут



**Рис.1.** Экспериментальная установка для неравенства Белла. Петр готовит две частицы и отправляет одну из них Алисе, а другую Бобу. Алиса может измерить на ней свойства частицы Q и R, в то время как Боб может измерить S и T на своей частице. Результаты, измерений могут быть только  $Q, R, S, T = \pm 1$

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

быть  $S, T = \pm 1$ . Все четыре свойства ( $Q, R, S, T$ ) объективны и результаты измерений ( $Q, R, S, T$ ) имеют вполне определенную физическую интерпретацию.

Схема испытания нарушения неравенств Белла.

Неравенство Белла требует, чтобы

$$|E(QS) + E(RS) + E(RT) - E(QT)| \leq 2. \quad (2)$$

Рассуждения вывода неравенства Белла для классических систем можно повторить для квантовых систем. Для этого можно рассмотреть пару запутанных кубитов, например, в состоянии  $\psi = 1/\sqrt{2}(|01\rangle - |10\rangle)$ . Петр отправляет одну из запутанных частиц Алисе, а другую – Бобу. Для наблюдения кубитов можно привлечь однокубитные вентили – вентиль  $X$  (переставляет компоненты кубита) и вентиль  $Z$  (переворачивает знак кубита), с помощью которых Алиса и Боб измеряют свои наблюдаемые:

Алиса  $\rightarrow Q = Z_1, R = X_1$ .

Боб  $\rightarrow S = 1/\sqrt{2}(-Z_2 - X_2), T = 1/\sqrt{2}(Z_2 - X_2)$ .

Наблюдаемые  $Q$  – это выходы  $Z$ -вентиля и  $R$  –  $X$ -вентиля с входной частицей Алисы. Аналогичная интерпретация справедлива для наблюдаемых пар Боба. Тогда средние значения наблюдаемых пар удовлетворяют следующим соотношениям:

$$\langle QS \rangle = \langle RS \rangle = \langle RT \rangle = \sqrt{1/2}, \langle QT \rangle = -\sqrt{1/2}. \quad (3)$$

Откуда следует, что

$$\langle QS \rangle + \langle RS \rangle + \langle RT \rangle - \langle QT \rangle = 2\sqrt{2}. \quad (4)$$

Это означает, что квантовая механика предсказывает значение суммы средних наблюдаемых, нарушающих неравенство Белла. Если при использовании двух различных теорий получаются два противоречивых результата, то это означает, что одна из моделей неверна, и для определения справедливости возникает необходимость обратиться к экспериментам, которые доказали правильность квантовой механики. Это означает, что, по крайней мере, одно из двух предположений здравого смысла в случае квантовой механики, представленных в начале дискуссии, не верно, например, вопросы, связанные с нелокальностью.

Создание запутанности между очень удаленными местами, таким образом, является важной целью.

### 3. О нарушении неравенства Белла в экспериментах с удаленными спин-электронными состояниями в NV-центрах [4]

Нарушение неравенства Белла [2] запутанными квантовыми системами показывает, что квантовая физика несовместима с локальным реализмом. Для строгой экспериментальной де-

монстрации такого нарушения:

- во-первых, настройки аппаратуры детектирования двух удаленных наблюдателей должны изменяться случайным образом так быстро, чтобы никакая информация о настройках не могла передаваться от одного наблюдателя к другому со скоростью света или короче времени протекания каждого измерения, и,

- во-вторых, эффективность обнаружения должна быть так высока, что результаты эксперимента, с точки зрения локальных особенностей не могли бы быть объяснены тем, что системы зависят от настроек аппарата и выборочно избегают детектирования.

Эксперименты, не отвечающие этим двум условиям, оставляют открытыми лазейки соответственно в локализации и в обнаружении (детектировании).

Заккрытие первой лазейки было рассмотрено в экспериментах с запутанными фотонами, а второй – в экспериментах с захваченными ионами, но несмотря на несколько предложений, закрытие обеих лазеек в одном эксперименте, до сих пор оставалось трудно достижимой целью.

Уже много лет парадоксальные предсказания квантовой теории вызывали споры о природе реальности. В основополагающей работе Белл доказал, что никакая теория природы, подчиняющаяся локальности и реализму, не может воспроизвести все предсказания квантовой теории.

Белл показал, что в любой локальной реалистической теории корреляции между удаленными измерениями удовлетворяют неравенству и, кроме того, что это неравенство может быть нарушено согласно законам квантовой теории. Это обеспечило рецепт экспериментальной проверки фундаментальных принципов, законов природы. Многочисленные остроумные эксперименты по проверке неравенства Белла, проводимые с целью получения противоречия с локальным реализмом, использовали в них ограничения с введением какого-либо дополнительного предположения, которое приводило к лазейкам. В статье [4] была использована схема эксперимента Белла, которая была свободна от любого такого дополнительного предположения и, таким образом, напрямую проверяла принципы, лежащие в основе неравенства Белла. Эффективное считывание спина позволило избежать допущения о справедливой выборке (лазейка в обнаружении), в то время как использование быстрого случайного выбора и считывания в сочетании с достаточно большим пространственным разделением в 1,3 км обеспечило требуемые условия локальности.

В этой работе [4] было проведено 245 испы-

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

таний, проверяющих неравенства CHSH-Белла  $S \leq 2$  и был достигнут результат  $S = 2,42 \pm 0,20$ .

Этот результат устраняет из рассмотрения большого класса теорий локального реализма.

В эксперименте Белла в форме, предложенной CHSH [3] (рисунки 2-4) участвуют два блока, А и В. Каждый блок может принимать двоичные входные данные (0 или 1), а затем выдавать двоичные выходные данные (+1 или -1). В каждом испытании теста Белла случайный входной бит генерируется с каждой стороны и вводится в соответствующий блок. Случайный входной бит устанавливает блок для создания выходного значения, которое записывается.

Тест связывает корреляции между выходными значениями (соответственно,  $x$  и  $y$  для блоков А и В) и входными битами (соответственно,  $a$  и  $b$  для А и В), созданные в рамках одного и того же испытания. Открытие Белла, заключается в том, что в любой физической теории, которая одновременно локальна (взаимодействия не распространяются быстрее света) и реалистична (физические свойства определяются до наблюдения и не зависят от наблюдателя), эти корреляции ограничены сильнее, чем в квантовой теории.

А именно, если входные биты можно считать свободными случайными величинами, и блоки удалены на достаточную дистанцию, гарантирующую, что за временную продолжительность проводимого испытания реализованное местоположение препятствует общению в блоках между физическими процессами, то при условии локального реализма выполняется следующее неравенство:

$$S = \langle x \cdot y \rangle_{(0,0)} + \langle x \cdot y \rangle_{(0,1)} + \langle x \cdot y \rangle_{(1,0)} - \langle x \cdot y \rangle_{(1,1)} \leq 2, (5)$$
 где  $\langle x \cdot y \rangle_{(a,b)}$  обозначает математическое ожидание произведения  $x$  и  $y$  для входных битов  $a$  и  $b$ .

Квантовая теория предсказывает, что в экспериментах с запутанными состояниями неравенство Белла может существенно нарушаться. В качестве такого эксперимента было предложено рассмотреть спиновую степень свободы одиночных электронов, помещенных по одному в каждый блок, которые образуют двухуровневую систему с собственными состояниями  $|\uparrow\rangle$  и  $|\downarrow\rangle$ .

Для каждого испытания два спина переводятся в запутанное состояние.

$$|\psi\rangle = (|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle) / \sqrt{2}. (6)$$

Затем спин в блоке А измеряется по направлению Z (для входного бита  $a=0$ ) или X (для  $a=1$ ), а спин в блоке В измеряется по направлению  $(-Z+X)/\sqrt{2}$  (для  $b=0$ ) или  $(-Z-X)/\sqrt{2}$  (для  $b=1$ ). Если результаты измерения используются в качестве выходных данных блоков, то квантовая теория предсказывает значение  $S = 2\sqrt{2}$ , у-

верждая, что сочетание локальности и реализма принципиально несовместимо с предсказаниями квантовой механики.

Результатом этого аргумента могло бы явиться то, что, по крайней мере, одно из трех утверждений истинно:

- (1) частицы должны обмениваться информацией мгновенно, т.е. быстрее света;
- (2) существуют скрытые переменные, поэтому результаты экспериментов предопределены;
- (3) квантовая теория в этих довольно специальных экспериментах не совсем верна.

Первая возможность может быть описана как отказ от принципа локальности, согласно которому сигналы не могут передаваться от одной частицы к другой со скоростью, превышающей скорость света. Это предложение было неприемлемым для авторов ЭПР. Поэтому они пришли к выводу, что если квантовая теория верна, то есть, исключена возможность (3), то (2) должно быть верно. С точки зрения ЭПР и других авторов, квантовая теория не полна, и ее нужно было дополнить скрытыми переменными.

Однако Белл продемонстрировал некоторые нежелательные свойства теорий со скрытыми переменными. Главное, что они были нелокальными. Он продемонстрировал это, расширив аргумент ЭПР, позволив измерять в каждом блоке эксперимента любой компонент спина.

Белл обнаружил, что даже когда разрешены скрытые переменные, в некоторых случаях результат, полученный в одном блоке, должен зависеть от того, какая компонента спина измеряется в другом, а это нарушает локальность.

Решение проблемы ЭПР, которое могли бы принять авторы, отвергнув (1), но сохранив (2), было неправомерным. Даже если кто-то сохранил (2), до тех пор, пока он сохранял (3), он также должен был сохранить (1).

Вернемся к проблеме локальности. Таким образом, предполагается, что квантовая теория совершенно верна, но, конечно, это никогда не может быть известно. Но возникло известное неравенство Белла-CHSH, открывающее возможность прямой экспериментальной проверки локального реализма. В экспериментах типа ЭПР этому неравенству подчиняются локальные скрытые переменные, но оно может нарушаться другими теориями, включая квантовую теорию.

Нарушение неравенства Белла с запутанными частицами ставит две основные проблемы: исключить любые возможные связи между блоками (локальная лазейка) и гарантировать эффективные измерения (детектируемая лазейка).

Во-первых, если связь возможна, блок в принципе может ответить, используя знание

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

обеих входных настроек, что делает неравенство Белла недействительным.

Таким образом, условия локальности требуют, чтобы блоки А и В и их соответствующие поколения свободных входных битов могут быть разделены таким образом, чтобы сигналы, движущиеся со скоростью света (максимально допустимой в специальной теории относительности) не могли бы передать локальную входную настройку блока А блоку В до того, как будет записано выходное значение блока В и наоборот. Кроме того, входные биты не должны влиять на подготовку запутанного состояния.

Во-вторых, не принимая во внимание испытания, в которых блок не производит выходной бит (т.е. при условии справедливой выборки), позволит блоку выбирать испытания на основе настройки входа.

Таким образом, предположение о справедливой выборке открывает лазейку в детектировании: в выбранном подмножестве может быть выявлено нарушение, даже если в наборе всех испытаний этого не может быть.

Лазейка локальности устраняется с помощью пар фотонов, разнесенных на большое расстояние, в сочетании с быстротой генерации случайных чисел, обеспечивающих входные настройки.

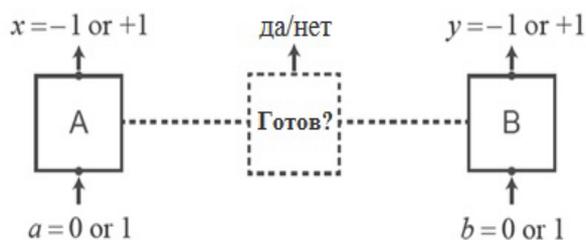
Однако из-за несовершенства детекторов и неизбежной потери фотонов в течение пространственной запутанности, такие эксперименты могут оставлять открытой лазейку детектирования. Лазейку детектирования смогли закрыть в различных экспериментах, но в них не была закрыта лазейка локальности. Из-за незакрытых лазеек экспериментально неравенство Белла нельзя проверять без введения дополнительных допущений. Таким образом, тест Белла, который одновременно закрывает все экспериментальные лазейки, обычно называемый тестом Белла без лазеек, имеет основополагающую

значение для понимания природы. Кроме того, свободный от лазеек тест Белла является критической составляющей независимых протоколов квантовой безопасности и сертификации случайности. В таких враждебных сценариях все лазейки должны быть закрыты, поскольку они допускают нарушения безопасности в системе. Один из подходов к реализации установки без лазеек использовал идею, состоящую в том, чтобы записать дополнительный сигнал (рамка в середине *рисунка 2*), чтобы указать, было ли успешно распределено требуемое запутанное состояние между А и В, т.е. были ли эти блоки готовы к использованию для испытания теста Белла.

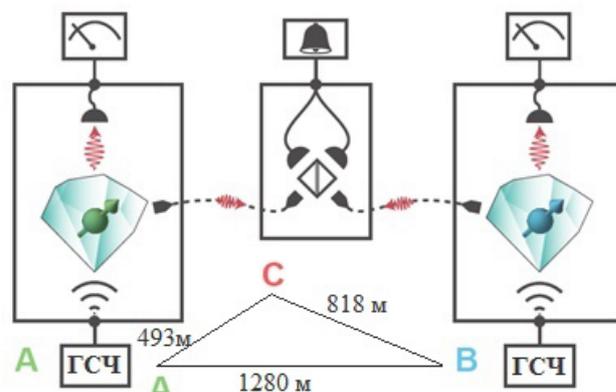
При проверке достоверности испытания теста Белла на этом готовом к событию сигнале неудачные события распределения запутанности исключались из использования в тесте Белла. Для этого создают установку с блоками, которые используют электронный спин, связанный с NV-центром дефекта в алмазном кристалле (*рисунок 3*).

Установка состоит из трех отдельных лабораторий, А, В и С. Каждый из блоков в точках А и В содержит один спин электрона в NV центре алмаза. Квантовый генератор случайных чисел (ГСЧ) используется для ввода данных в блок. Спин считывается в базе, который зависит от входного бита, и результирующий сигнал обеспечивает вывод из блока. Третий блок в точке С регистрирует прибытие одиночных фотонов, которые ранее были испущены, и были запутаны со спинами в точках А и В. Обнаружение двух таких фотонов составляет готово-читаемый сигнал.

Алмазные кристаллы устанавливаются в криостатах замкнутого цикла ( $T=4K$ ), расположенных в удаленных лабораториях А и В (*рисунок 4*). Контроль каждого спин-электронного состояния осуществляется с помощью микроволновых



**Рис. 2.** Тестовая установка Белла [4]: два блока, А и В, принимают двоичные входные данные (а;в) и производят двоичные выходные данные (х,у). В сценарии о готовности к событию дополнительный блок С выдает двоичный сигнал, сигнализирующий, что блоки А и В были успешно подготовлены



**Рис. 3.** Экспериментальная реализация [4]

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

импульсов, подаваемых на полосковые линии на кристалле.

Спины инициализируются с помощью оптической накачки и считываются посредством спин-зависимой флуоресценции.

Считывание основано на резонансном возбуждении спин-селективного циклического перехода (время жизни 12 нс), в результате чего NV центр испускает много фотонов, когда он находится в ярком состоянии спина  $m_s=0$ , в то время как он остается темным, когда он находится в любом из состояний  $m_s = \pm 1$ . В случае записи фотодетектором в течение окна считывания хотя бы одного отсчета, ему присваивается выходное значение +1 ( $m_s=0$ ), и в противном случае – выходное значение -1 ( $m_s=1$ ) [4].

Электронный спин, связанный с одним центром азотной вакансии (NV) в алмазе, расположен в низкотемпературной конфокальной микроскопической установке (Obj). Быстрый переключатель (Sw) передает только один из двух различных микроволновых (СВЧ) импульсов ( $P_0$  и  $P_1$ ), в зависимости от выходного сигнала квантового генератора случайных чисел (ГСЧ). Затем микроволновые импульсы подаются через золотую полоску, нанесенную на поверхность алмаза (вставка, изображение аналогичного устройства с помощью сканирующего электронного микроскопа). Оптические частоты NV настраиваются преобразователем постоянного тока d.c. электрического поля, приложенного к электродам затвора на кристалле (вставка). Для резонансного возбуждения оптических переходов NV-центра используются импульсные красный и желтый лазеры. Излучение (штриховые стрелки) спектрально разделено с помощью дихроичного зеркала (DM) на нерезонансную часть (фононная боковая полоса, PSB) и резонансную часть (бесфононная линия, НФЛ=ZPL).

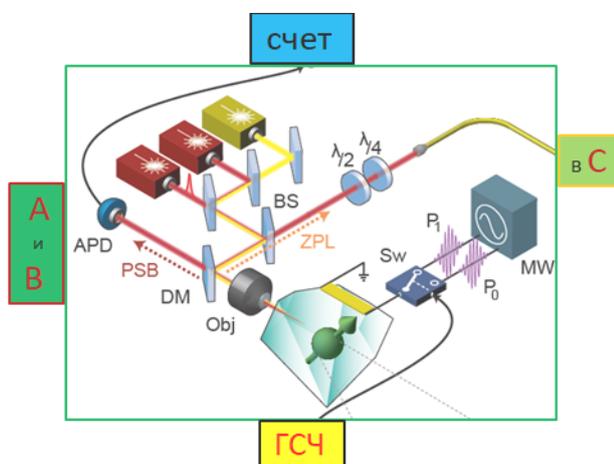


Рис. 4. Подробная экспериментальная установка [4] в точках А и В

Излучение PSB регистрируется с помощью счетчика одиночных фотонов (APD), события регистрации которого регистрируются вместе с генерируемыми случайными числами устройством метки времени. Излучение НФЛ=ZPL в основном передается через светоделитель (BS, отражение 4%) и две волновые пластины ( $\lambda/2$  и  $\lambda/4$ ), после чего оно соединяется с одномодовым отражателем, который направляет свет в точку С.

Между двумя удаленными спинами запутанность создается путем обмена запутанностью фотонов по схеме Барретта-Кока [4] с использованием третьего местоположения С (примерно посередине между А и В).

Сначала запутывается каждый спин со временем испускания одного фотона (время – бинарная кодировка), затем два фотона отправляются на светоделитель, расположенный в месте С, с последующим их детектированием.

Если фотоны неразличимы, наблюдение одного раннего и одного позднего фотона в разных выходных портах светоделителя проецирует спины в А и В в максимально запутанные состояния  $|\psi\rangle = 1/\sqrt{2}(|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle)$ , где  $m_s=0=|\uparrow\rangle$ ,  $m_s=1=|\downarrow\rangle$ . Эти детектирования предвещают успешную подготовку и играют роль сигнала готовности к дальнейшему процессу измерений в данной установке.

Это гарантирует, что этот сигнал готовности к событию пространственно-подобно отделен от генерации случайных входных битов в точках А и В.

Дистанция разделения спинов на 1280 м составляет 4,27 мкс образует временное окно, в течение которого локальные события в А и В пространственно-подобно отделены друг от друга. Для соблюдения условий локальности теста Белла выбор баз измерения и измерение спинов следует проводить в пределах этого временного окна.

Для выбора базиса используются генераторы с быстродействующим выбором случайных чисел в реально-временном случайном извлечении.

Таким образом, использование схемы готовности к событию позволило эксплуатировать сильно запутанные спиновые состояния и одновременно соблюсти строгие условия локальности установки Белла, в то время как однократный характер считывания спина закрывал лазейку обнаружения.

Перед запуском теста Белла сначала необходимо охарактеризовать настройку и подготовку спин-спинового запутанного состояния. Затем оценивается степень неразличимости одиночных фотонов, испускаемых из точек А и В в экс-

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

перименте с двухфотонной интерференцией в точке С, т. е. после того, как фотоны прошли путь общей протяженностью 1,7 км одномодового оптического волокна. Используя наблюдаемый двухфотонный интерференционный контраст  $0,90 \pm 0,06$  и данные спин-фотонной корреляции, точность идеального состояния  $|\psi\rangle$  спин-спиновых запутанных состояний, генерируемых в установке, составляет  $0,92 \pm 0,03$ . Таким образом, ожидается, что в сочетании с измеренной точностью считывания сгенерированное запутанное состояние нарушит неравенство CHSH-Белла с  $S=2,30 \pm 0,07$ .

На основании 245 испытаний теста Белла в течение 220 часов измерительного времени обобщение всех наблюдаемых данных позволило заключить, что  $S=2,42$  при нарушении неравенства CHSH-Белла  $S \leq 2$ .

Обсуждаемый эксперимент реализует первый тест Белла, который одновременно устранил как лазейку обнаружения, так и лазейку локальности. Будучи свободным от экспериментальных лазеек, установка может проверять локальные реалистические теории природы без введения дополнительных допущений, таких как справедливая выборка, ограничение на (суб) световую связь или отсутствие памяти в установке.

#### 4. Нарушение неравенства Белла в В-мезонах. Тесты Белла с В-мезонами при высоких энергиях

В квантовой механике двухчастичная неразделимая волновая функция приводит к нелокальной спиновой корреляции.

$$|\psi\rangle = 1/\sqrt{2} [|\uparrow\rangle_1 \otimes |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 \otimes |\uparrow\rangle_2] \quad (7)$$

где  $|\uparrow\rangle_j$  ( $|\downarrow\rangle_j$ ) описывает спиновое состояние  $j$ -й частицы ( $j=1,2$ ) со спином вверх (вниз) соответственно. Обобщенное неравенство Белла для пары запутанных фотонов с двумя анализаторами поляризации:

$$S = E(\alpha, \beta) - E(\alpha, \beta') + E(\alpha', \beta) + E(\alpha', \beta') \leq 2, \quad (8)$$

где  $\alpha, \alpha'$  и  $\beta, \beta'$  – возможные настройки угла на поляризаторах.  $E(\alpha, \beta)$  – корреляционная функция результата измерения поляризации с обеих сторон:

$$E(\alpha, \beta) = \int d\lambda \rho(\lambda) \mu(\alpha, \lambda) \mu(\beta, \lambda) = \int d\lambda \rho(\lambda) \mu(\alpha, \lambda) \mu(\beta, \lambda), \quad (9)$$

где  $\mu(\alpha, \lambda)$  – результат измерения поляризации ( $\alpha = \pm 1$ ), определяемый установкой локального угла и глобальной скрытой переменной  $\lambda$ ,  $\rho(\lambda)$  является (интегрируемым) распределением вероятностей. В данном выражении было сделано предположение о локальности, что результат на одной стороне не зависит от настройки другой стороны, и наоборот:  $\mu(\alpha, \lambda)$  не зависит от  $\beta$ . С другой стороны, квантовая механика предска-

зывает  $E(\alpha, \beta) = \cos(\alpha - \beta)$ . В реальных экспериментах из-за конечной эффективности детекторов нет доступа к  $E(\alpha, \beta)$ , измеряются только коэффициенты совпадения, такие как  $R_{++}(\alpha, \beta)$  для  $(+1, +1)$  коэффициент совпадения. Предполагая, что набор обнаруженных событий составляет справедливую выборку, используется нормированная корреляционная функция [5]:

$$E_R(\alpha, \beta) = \frac{R_{++}(\alpha, \beta) + R_{--}(\alpha, \beta) - R_{+-}(\alpha, \beta) - R_{-+}(\alpha, \beta)}{R_{++}(\alpha, \beta) + R_{--}(\alpha, \beta) + R_{+-}(\alpha, \beta) + R_{-+}(\alpha, \beta)}. \quad (10)$$

Для  $S$  достаточно рассмотреть следующий однопараметрический набор параметров ( $\phi$ ) настроек:  $\alpha=0, \alpha'=2\phi, \beta=\phi$  и  $\beta'=3\phi$ . Тогда неравенство Белла-CHSH принимает вид:

$$S(\phi) = 3E_R(\phi) - E_R(3\phi) \leq 2. \quad (11)$$

В работе [5] показано предсказание квантовой механики  $S(\phi)$ , наблюдается явное нарушение неравенства Белла-CHSH во всем диапазоне  $0^\circ < \phi < 68,5^\circ$  и максимальное нарушение в  $\sqrt{2}$  раз при  $\phi=45^\circ$ .

Много экспериментов проводилось, в основном, при тестировании поляризационных или спиновых корреляций, но с корреляциями частица-античастица проверка проведена в В-мезонах в эксперименте Belle КЕК [5].

Волновая функция  $\Upsilon(4S) \Rightarrow B^0 \bar{B}^0$  имеет точно такой же формализм, что и пара фотонов:

$$|\psi\rangle = 1/\sqrt{2} [ |B^0\rangle_1 \otimes |B^{*0}\rangle_2 - |B^{*0}\rangle_1 \otimes |B^0\rangle_2 ]. \quad (12)$$

Здесь  $|B^0\rangle$  и  $|B^{*0}\rangle$  – собственные состояния нейтрального В-мезона и его античастицы  $B^*$ , которые вместе образуют полный ортонормированный базис в двумерном комплексном гильбертовом пространстве  $C^2$ , описывающем внутренние степени свободы одиночного мезона.

Полное пространство состояний пары В-мезонов задается тензорным произведением  $C^2 \times C^2$  соответствующих гильбертовых пространств.

Состояние  $|\psi\rangle$  запутано, так как оно не может быть факторизовано как прямой продукт одно-частичных состояний и, как таковой, демонстрирует сильную корреляцию между своими составляющими. Таким образом, можно ожидать, что корреляция между нейтральными В-В\* мезонами при подходящих условиях измерения может вызвать нарушение неравенства Белла.

Временная эволюция нейтрального В-мезона описывается уравнением Шредингера  $id/dt |\psi\rangle = H |\psi\rangle$  (принято, что постоянная Планка  $\hbar=1$ ) с гамильтонианом:

$$\hat{H} = \begin{pmatrix} M_{11} - i\Gamma_{11}/2 & M_{12} - i\Gamma_{12}/2 \\ M_{21} - i\Gamma_{21}/2 & M_{22} - i\Gamma_{22}/2 \end{pmatrix}, \quad (13)$$

записанном в собственном базисе частица-анти-

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

частица

$$|B^0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, |B^{*0}\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (14)$$

В силу СРТ симметрии массы и времена жизни частицы и античастицы равны, то есть  $M_{11}=M_{22}=M$ ,  $M_{21}=M_{12}^*$  и  $\Gamma_{11}=\Gamma_{22}=\Gamma$ ,  $\Gamma_{21}=\Gamma_{12}^*$ . Симметрия гамильтониана  $H$ , относительно СР-преобразования,  $(CP)^\wedge H$ ,  $(CP)=H$ , преобразующая античастицу (частицу) в частицу (античастицу) -  $|B^0\rangle = CP|B^{*0}\rangle$ ,  $|B^{*0}\rangle = CP|B^0\rangle$ , дает следующие соотношения  $M_{12}=M_{21}$  и  $\Gamma_{12}=\Gamma_{21}$ .

Заметим, что  $\langle B^0|H|B^{*0}\rangle \neq 0$  подразумевает, что эволюция во времени вызывает переход частицы в античастицу, называемый смешиванием частицы-античастицы [10].

Кроме того, неэрмитов гамильтониан  $H$  описывает распад  $B$ -мезона на другие частицы, что приводит к постепенному уменьшению вероятности сохраниться в состоянии  $B$ -мезона. Собственные состояния гамильтониана  $H$ , называемые массовыми собственными состояниями, принимают вид

$$|B_H\rangle = (|B^0\rangle + |B^{*0}\rangle)/\sqrt{2}, |B_L\rangle = (|B^0\rangle - |B^{*0}\rangle)/\sqrt{2} \quad (15)$$

с собственными значениями,  $\lambda_H = M_H - i\Gamma_H/2$  и  $\lambda_L = M_L - i\Gamma_L/2$ , где

$$M_{H,L} = M \pm M_{12}, \Gamma_{H,L} = \Gamma \pm \Gamma_{12}. \quad (16)$$

Так как разница в ширине времен жизни крайне мала  $\Gamma_H - \Gamma_L = 0,001\Gamma$  можно принять приближение  $\Gamma_H = \Gamma_L = \Gamma$ .

Из эволюции собственных массовых состояний

$$|B_H(t)\rangle = \exp(-iHt)|B_H\rangle; |B_L(t)\rangle = \exp(-iHt)|B_L\rangle \quad (17)$$

следует, что запутанное состояние  $|\psi\rangle$ , рожденное при  $t=0$  и соответствующим двум собственным временам  $t_1$  и  $t_2$  их распадов, приобретает следующий вид:

$$|\psi(t_1, t_2)\rangle = 1/\sqrt{2}(|B_H(t_1)\rangle|B_L(t_2)\rangle - |B_L(t_1)\rangle|B_H(t_2)\rangle). \quad (18)$$

Вводя дихотомические переменные  $A, B$  такие, что  $A, B = +1$  для  $B^0$  и  $A, B = -1$  для  $B^{*0}$ , можно вывести квантовое совместное распределение

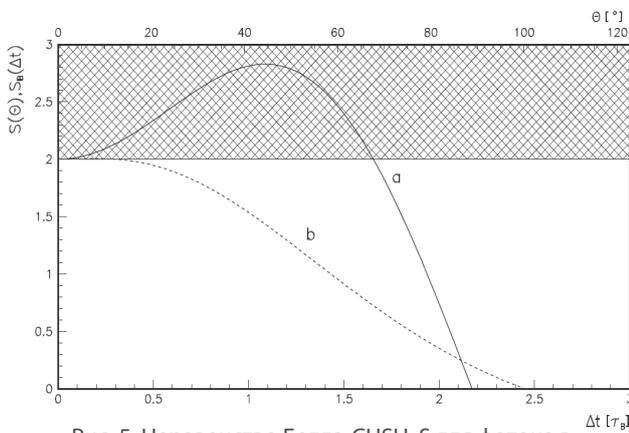


Рис. 5. Неравенство Белла-CHSH.  $S$  для фотона в синглетном состоянии (а) и  $(4S) \rightarrow B^0 B^{*0}$  с (b) и без (а) перенормированной вероятности распада. Заштрихованная область нарушает неравенство Белла

вероятностей детектирования  $A, B$  во времена распадов  $t_1$  и  $t_2$  [5]:

$$P^Q(A, B, t_1, t_2) = 1/4 \exp\{-\Gamma(t_1+t_2)\} (1 - AB \cos \Delta M \Delta t) \quad (19)$$

с  $\Delta t = t_1 - t_2$  и  $\Delta M = M_H - M_L = 3,334 \times 10^{-10}$  МэВ [10].

Экспериментальный метод распадов  $Y(4S) \rightarrow B^0 B^{*0}$ . Измерение ( $B^0$  или  $B^{*0}$ ) одной частицы, не определенной до измерения, будет определять тип второй частицы в тот же момент. По сравнению с фотонами вместо выбора угла поляризатора, измеряют частицу либо античастицу при различных временах жизни,  $t_a$  и  $t_b$  (влияние смешивания то же, что и вращение поляризатора [5]).

Основное отличие состоит в том, что  $B$ -мезоны, распадаясь, уменьшают количество совпадений [5], например

$$R_{B^0 B^0}(t_a, t_b) = 1/4 \exp(-2t'/\tau_B) \exp(-\Delta t/\tau_B) \{1 - \exp(-\Delta t/\tau_B) \cos(\Delta m_d \Delta t)\}. \quad (20)$$

Соответственно корреляционная функция имеет вид:

$$E(t_a, t_b) = -\exp(-2t'/\tau_B) \exp(-\Delta t/\tau_B) \cos(\Delta m_d \Delta t), \quad (21)$$

где  $\Delta m_d$  - параметр смешения  $B^0 - B^{*0}$  [10];

$\tau_B = \tau(B_L^0) \approx \tau(B_H^0) = 1,542$  пс - среднее время жизни  $B^0$ ;

$t' = \min(t_a, t_b)$  и  $t = |t_a - t_b|$ . Это затухание делает невозможным нарушение неравенства Белла-CHSH (рисунк 5) [5]. Однако, если нормировать корреляционную функцию на нераспавшуюся пару  $B^0 B^{*0}$  (см. выше уравнение для  $E(\alpha, \beta)$  [5]), то корреляционная функция точно такая же, как и в фотонном случае, и зависит только от  $t$ :

$$E_R(t) = \cos(\Delta m_d \Delta t).$$

Неравенство Белла-CHSH становится:

$$S(t) = 3ER(t) - ER(3t) \leq 2$$

Ниже  $t \approx 1,7 \tau_B = 2,62$  ps неравенство Белла нарушается, как и при фотонной поляризации (рисунк 5) [5]. Используя полулептонные  $B^0$ -распады  $(4S)$  в эксперименте Belle, в корреляции частица-античастица было обнаружено явное нарушение неравенства Белла: После отбора событий и вычитания фонов (3186 событий) оставшиеся события были разделены и оценены в качестве частиц и анти-частиц. Обе корреляционные функции  $E_R(\Delta t)$  и  $S(\Delta t)$  были сформированы, и явное нарушение неравенства Белла было показано при  $\Delta t = (2 \pm 0,5) ps$ :  $S = 2,725 \pm 0,167$  стат  $\pm 0,092$  сист.

Неравенство Белла является основным пробным камнем тестирования локального реализма, постулированного ЭПР во времена формирования квантовой теории. Распространение на системы с более высокими энергиями имеет важное значение для установления нелокальности универсального характера, и в статье [8] было представлено имитационное исследование осуществимости теста Белла с помощью запутан-

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ности пары В-мезонов в pp-соударениях в эксперименте ATLAS на Большом Адронном Коллайдере LHC.

Моделирование привело к директиве: можно найти максимальное нарушение неравенства Белла при разнице во времени  $\Delta t = 1,5$  пс в распадах двух запутанных В-мезонов, снова отвергая локальный реализм на самом высоком уровне энергии 14 ТэВ [6-8]. Это будет первый случай нарушения неравенства Белла в сообществе экспериментаторов по физике элементарных частиц, учитывая, что более ранний анализ с экспериментом Belle оказались неубедительным, в первую очередь из-за отсутствия процесса отбора пространственноподобных событий и независимого отождествления времен затухания. Первое ведет к лазейке в локальности, а второе приводит к увеличению верхней границы неравенства Белла. Кроме того, эксперимент с использованием нейтральные пары К-мезонов не является тестом Белла, потому что он измеряет не  $S^Q(\Delta t)$ , а корреляционную функцию  $C^Q(t_1, t_2)$ , где  $|t_1 - t_2| = t$ . Напротив, эксперимент [7-8] ATLAS допускает независимые измерения времени затухания, который позволяет определить процесс отбора, полностью закрывающий лазейку локальности в тесте Белла.

Оставшийся вопрос, с точки зрения стандартного теста Белла является лазейкой в эффективности, момент, когда нужно полагаться на предположение о справедливой выборке для этого. В связи с этим повышение эффективности обнаружения является желательным либо за счет увеличения доступного режима затухания или улучшения обработки выбора сигнала.

### Литература

1. Царьков А.Н., Смуров С.В., Волков Г.Г., Масликов А.А., Капитонов И.Ю. Симметрично-групповые расширения аксиом квантовой физики в динамике квантовых спиновых систем // Известия Института инженерной физики, 2019. №1(54). С.84-92.
2. J.S. Bell. On the Einstein Podolsky Rosen paradox, *Physics Physique Fizika* 1 (1964) 195.
3. J.F. Clauser, M.A. Horne, A. Shimony and R.A. Holt. Proposed experiment to test local hidden-variable theories, *Phys. Rev. Lett.* 23, 880 (1969).
4. B. Hensen et al. Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres, *Nature* 526 (2015) 682 [1508.05949].
5. Apollo Go. Observation of Bell Inequality violation in B mesons Belle Collaboration, *quant-ph/0310192*. V1. 31 Oct 2003.
6. Rachel Ashby-Pickering, Alan J. Barr, Agnieszka Wierchuckaa. Quantum state tomography, entanglement detection and Bell violation prospects in weak decays of massive particles.
7. Alan Barr. Testing Bell inequalities in Higgs boson decays arXiv: 2106.01377, 2021.
8. Y. Takubo et al. On the Feasibility of Bell Inequality Violation at ATLAS Experiment with Flavor Entanglement of  $B^0$ - $B^{*0}$  Pairs from pp Collisions arXiv: 2106.07399v2 [hep-ph], 2021.
9. D.C. Marinescu and G.M. Marinescu. Lectures on Quantum Computing Computer Science Department, University of Central Florida (2003).
10. G.G.Volkov, A.G.Liparteliani, V.A.Monich and Yu.P.Nikitin. *Yadernaya Fizika (Sov. J.Nucl. Phys.)* 34 (1981), 435.

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТАГРАММАТИК ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

## FEATURES OF APPLICATION OF METAGRAMMARS FOR MODELING OF COMPLEX STRUCTURED PROCESSES OF FUNCTIONING OF AUTOMATED CONTROL SYSTEMS OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF NUCLEAR POWER PLANTS

**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

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

**Михаил Николаевич Лысачев**  
генеральный директор АО «Консист – ОС»  
Адрес: 115432, Москва, Проектируемый проезд  
№4062, д. 6, стр. 25

**Эдуард Игоревич Атакищев**  
заместитель главного инженера  
по эксплуатации Курской АЭС 2  
Адрес: 109507, г. Москва, ул. Ферганская, д. 25

**Кирилл Эдуардович Атакищев**  
инженер БКП-6 инженерингового дивизиона  
АО «Атомэнергопроект»  
Адрес: 107996, Москва, Бакунинская ул., д. 7, стр. 1

**Валерий Олегович Мовчан**  
военнослужащий МО РФ

### Аннотация

Рассмотрен один из подходов к построению алгоритма для битовой перестановки, которая может бы Аннотация

Рассмотрены особенности применения метаграмматик для моделирования сложноструктурированных процессов функционирования автоматизированных систем управления технологическими процессами атомных электростанций. Особое внимание уделено интеграции отдельных производственных моделей процессов функционирования в рамках иерархических и сетевых метаграмматик, их использованию при анализе сложноструктурированных процессов функционирования автоматизированных систем управления технологическими процессами атомных электростанций.

**Ключевые слова:** автоматизированные системы управления технологическими процессами, атомные электростанции, процессы функционирования, моделирование, метаграмматики, метод анализа иерархий Саати.

### Summary

The features of the use of metagrammars for modeling complex structured processes of functioning of automated process control systems of nuclear power plants are considered. Special attention is paid to the integration of individual production models of functioning processes within the framework of hierarchical and network metagrammars, their use in the analysis of complex structured processes of functioning of automated process control systems of nuclear power plants.

**Keywords:** automated process control systems, nuclear power plants, functioning processes, modeling, metagrammars, Saati hierarchy analysis method.

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Современный этап создания автоматизированных систем управления (АСУ) технологическими процессами (ТП) атомных электростанций (АЭС) характеризуется необходимостью решения комплекса проблем создания нового поколения АСУ ТП для модернизации существующих и строительства перспективных АЭС, в том числе малой мощности. [1-4].

Решение данного комплекса проблем должно учитывать ужесточение требований к эффективности функционирования АЭС, их безопасности, снижению финансовых затрат при функционировании АСУ ТП. Также необходимо учитывать объективное усложнение процессов управления ТП АЭС, необходимость обработки сверхбольших массивов мониторинговой и управляющей информации, автоматизированного многофакторного анализа ситуаций и принятия решений в реальном масштабе времени, а также учитывать большое число факторов и ограничений, влияющих на функционирование АСУ ТП.

Все это определяет необходимость создания АСУ ТП рассматриваемого класса на научной основе, опирающейся на учет структурно-параметрических особенностей контролируемых разнородных процессов в технологических подсистемах существующих и перспективных АЭС, особенностей их системной интеграции в рамках единого процесса управления ТП, наличия разнообразных организационно-технических и ресурсных ограничений.

В частности, при решении комплекса проблем создания перспективных АСУ ТП АЭС, должны учитываться следующие общие факторы:

- повышение требований к АСУ ТП по охвату возрастающего числа технологических процессов перспективных АЭС, число которых уже в настоящее время составляет несколько десятков тысяч;

- обеспечение требуемого уровня эффективности (полноты, достоверности, оперативности и т.п.) мониторинга как отдельных параметров ТП, так и интегральных параметров технологических подсистем;

- обеспечение требуемого уровня оперативности, целостности, достоверности при доведении полученных мониторинговых данных до подсистем обработки и принятия решений;

- повышение требований по автоматизации и производительности средств информационно-аналитической обработки мониторинговых данных на базе входящих в АСУ ТП вычислительных подсистем;

- повышение требований по интеллектуализации процессов мониторинга, информационно-аналитической обработки, принятия решений в АСУ ТП;

- повышение требований по надежности, информационной безопасности и референтности создаваемых АСУ ТП и входящих в них средств и подсистем (в том числе и в рамках референтной архитектуры «IT4IT») [1];

- ужесточение (по сравнению с существующими АЭС) нормативных (организационно-кадровых, технических, финансовых, временных и др.) требований;

- необходимость закладки уже на этапе проектирования АСУ ТП масштабируемости и тиражируемости проектных решений для реализации возможности дальнейшей структурно-алгоритмической модернизации АСУ ТП, возможности расширения их архитектуры, адаптации к новым условиям эксплуатации;

- возможность оперативного эволюционного наращивания возможностей АСУ ТП для перспективных АЭС;

- возможность интеграции АСУ ТП и их подсистем в единую систему управления АО «Концерн Росэнергоатом».

Учет данных общих и большого числа частных факторов при создании и анализе процессов функционирования АСУ ТП АЭС нового поколения определяет необходимость создания и использования комплекса моделей, отражающих особенности процессов функционирования АСУ ТП для различных условий эксплуатации и различных АЭС.

Создание адекватного ситуации комплекса моделей должно учитывать:

- разнородность и представительное число разработанных к настоящему времени моделей контролируемых в АСУ ТП процессов;

- сложность интеграции и взаимоувязки разработанных моделей в единый модельный комплекс, структурированный в соответствии с особенностями современных и перспективных АСУ ТП, а также позволяющий проводить оценку интегральных параметров функционирования подобных сложных систем;

- необходимость моделирования и анализа структурных взаимосвязей подсистем и элементов (правил их формирования) для сложных, интегрирующих десятки тысяч элементов и процессов АСУ ТП

Решение проблемы моделирования процессов функционирования АСУ ТП перспективных АЭС с учетом рассмотренных, зачастую взаимосвязанных и противоречивых факторов, в условиях высокой их структурной сложности, может быть достигнуто путем создания и развития общего математического аппарата, позволяющего структурно, с привязкой к правилам формирования общих процессов функциониро-

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

вания АСУ ТП, интегрировать известные и перспективные модели, рекурсивно отразить правила увязки моделей в единый комплекс на основе продукционной метаграмматической парадигмы [4-12], учесть вероятностные и нечеткие меры при их анализе, обеспечить оперативную структурно- алгоритмическую адаптацию комплекса моделей при расширении архитектуры АСУ ТП перспективных АЭС.

В данной статье, с целью создания продукционной основы моделирования сложноструктурированных процессов функционирования АСУ ТП рассматриваемого класса, предлагается использовать метаграмматику как основу формализации взаимосвязей и взаимоувязки большого числа моделей отдельных процессов функционирования АСУ ТП при их интеграции в рамках единого математического аппарата.

Также применение метаграмматик (МГ) позволяет:

- при задании структуры комплекса моделей в явном виде задавать не сами варианты структур объединения процессов функционирования АСУ ТП, а относительно небольшое число продукционных правил их формирования, дополнительно декомпозированное по правилам согласования МГ;

- существенно повысить возможности по заданию сложных структур взаимосвязей моделей и увязки их входных и выходных параметров (переменных, интерфейсов и т.п.);

- за счет декомпозиции систем правил формирования комплекса моделей с привязкой к организационно- технической архитектуре АСУ ТП существенно снизить сложность алгоритмов анализа интегрированных процессов функционирования АСУ ТП, расчета их параметров при использовании правил расчета унаследованных и синтезированных атрибутов атрибутивных МГ;

- создать формальную основу моделирования и анализа «интеллектуальных» процедур информационно- аналитической обработки мониторинговых данных, с возможностью «машинного обучения» подобных систем на основе методов синтеза и восстановления МГ; объяснения принятых решений («системы доверенного искусственного интеллекта») при выдаче структурированных деревьев разбора МГ и т.п.;

- реализовать с использованием МГ систему метаправил формирования протоструктур правил интеграции и анализа процессов функционирования АСУ ТП, так и дополнительных структур увязки целей, критериев и других факторов для анализа непосредственно создаваемых сложноструктурированных взаимоувязанных алгоритмов контроля на основе, например метода

анализа иерархий Саати [12-14].

Рассмотрим более подробно особенности применения метаграмматик для моделирования сложноструктурированных процессов функционирования АСУ ТП АЭС.

В основу математического аппарата теории метаграмматик положено использование специальным образом увязанных по правилам согласования в систему формальных грамматик.

МГ представляет собой грамматическую систему связанных по правилам согласования грамматик [6-11]:

$$G = \langle \{G_i\}, W \rangle,$$

где  $\{G_i\}$  – множество грамматик определенного вида  $i=1(1)N$ ,

$W$  – схема метаграмматики, определяющая набор правил согласования (определенного рода отображений) между грамматиками (элементами грамматик) множества  $\{G_i\}$ .

В работах авторов и ведущих научных школ [6-11] предложен вариант классификации МГ, рассмотрен ряд их свойств и преимуществ по сравнению с другими формальными моделями сложноструктурированных систем.

Для учета особенностей моделируемых процессов в АСУ ТП АЭС рассмотрены подклассы МГ, отличающиеся:

- мощностью множества  $\{G_i\}$ ;
- типом правил подстановки в грамматиках  $\{G_i\}$ ;
- типом дополнительных (экстралингвистических) правил в грамматиках, входящих в МГ;
- особенностью задания мер на множествах правил подстановки грамматик  $\{G_i\}$ ;
- типом применяемых специальных форм грамматик;
- однородностью множества  $\{G_i\}$ ;
- мощностью множества правил согласования;
- особенностью задания мер на множестве правил согласования;
- типом правил согласования;
- интерпретацией правил согласования;
- особенностью обобщенной схемы МГ в целом.

В прикладном аспекте применительно к решению рассмотренного комплекса проблем наибольший интерес представляют возможности МГ по заданию многоуровневых и сетевых комплексов моделей, отражающих соответственно, многоуровневую и сетевую увязку процессов в АСУ ТП.

В этом случае обобщенная схема МГ [9], представляется в виде многоуровневой или сетевой структуры взаимоувязанных грамматик.

Возможности по интеграции моделей в еди-

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ный комплекс с возможностью моделирования всего спектра взаимосвязей процессов в АСУ ТП АЭС реализуются с использованием правил согласования и продукций различных типов и интерпретаций [9]. В частности, правила согласования позволяют моделировать передачу атрибутов параметров различных моделей процессов, сигналов управления процессами, проводить декомпозицию элементов процессов более высоких уровней на структуры процессов более низких уровней, реализацию метаправил управления и порождения структур алгоритмов, их структурной адаптации и т.п.

В данном случае в МГ применение TS правил согласования с соответствующей интерпретацией позволяет проводить адаптивную структурную декомпозицию элементов грамматик (терминалов – Т) более высокого уровня на любую из цепочек процессов (структуру моделей), порождаемую из начального нетерминала S подчиненной грамматики. Применение TN правил согласования позволяет из грамматики верхнего уровня обращаться к структурам, порождаемых из промежуточного состояния процесса (соответствующего нетерминалу N).

В данном случае, в частности, реализуется структурная вложимость одних моделей инфокоммуникационных процессов в АСУ ТП в другие. В частности, пусть в схеме МГ для грамматик  $G_k, G_i$ , моделирующих правила формирования процессов различных уровней обработки мониторинговых данных или знаний о ситуации, существует TS или TN правило согласования, связывающее их, и в грамматике  $G_i$  существует цепочка правил порождения цепочки в из начального нетерминала  $S_i$  при порождении в  $G_k$  терминала  $a_k$ . С использованием данных правил реализуется принцип рекурсивной вложенности протоструктур процессов и их моделей, определяемых грамматикой  $G_i$  в структуру  $G_k$ , где производится (рекурсивно) замена процесса  $a_k$  на протоструктуры частных процессов  $\{\alpha_i\}$ , где  $S_i \Rightarrow \alpha_i$  [9].

При этом МГ может быть структурирована таким образом, чтобы схема  $W_M$  МГ отражала общую структуру взаимосвязей процессов (их моделей) в АСУ ТП, т.е. возможно задание отображения структуры

$$(\{P_i\}, \{V_{Ti}\}, \{V_{Ni}\}, \{S_i\})$$

на схему (обобщенную схему)  $W_M$  МГ. В рамках подобной структуризации комплекса моделей процессов контроля в АСУ ТП и описывающих правила их формирования однотипных (в определенном смысле) грамматик могут быть «стратифицированы» в грамматиках определенного уровня (страта) правила сбора структур

моделей процессов  $\{G_j\} \subset \{G_i\}$ . При этом также могут быть решены вопросы редукции продукционных моделей и решены вопросы исключения их дублирования [9].

ТР правила согласования позволяют задавать последовательности применения продукций из множества Р в грамматиках более низких уровней в зависимости от текущего порожденного терминала из множества Т грамматики более высокого уровня.

При использовании в МГ правил согласования, задающих генерацию протоструктур грамматик, графов различного вида, используемых при анализе и представлении знаний о ситуации в контролируемых ТП.

В частности, одна из входящих в МГ грамматика G, порождающая по продукционным метаправилам цепочки

$$\alpha^1 = \alpha_1^1 \dots \alpha_l^1 \dots \alpha_L^1, l = 1(1)L,$$

где  $\alpha_l^1 = \alpha_{Ti}^1 \alpha_{Ni}^1 \alpha_{Pl}^1$ ;

$$\alpha_{Ti}^1 = a_i^1(1) \dots a_i^1(k) \dots a_i^1(K_i), k = 1(1)K_i;$$

$$\alpha_{Ni}^1 = A_i^1(1) \dots A_i^1(m) \dots A_i^1(M_i), m = 1(1)M_i;$$

$$\alpha_{Pl}^1 = P_i^1(1) \dots P_i^1(n) \dots P_i^1(N_i), n = 1(1)N_i;$$

может применяться для моделирования «метаправил» порождения в «метарекурсивной форме» множества «протограмматик» нижележащего страта  $\{G_i^2\}, l = 1(1)L$ , моделирующих, в свою очередь, множество различных протоструктур процессов функционирования «подчиненных» подсистем АСУ ТП. В данном случае в МГ заданная грамматика  $G_i^2$ , входящая в  $\{G_i^2\}$ , представляется следующим образом:

$$G_i^2 = \langle V_{Ti}^2, V_{Ni}^2, P_i^2, S_i^2 \rangle,$$

где  $V_{Ti}^2 = \{a_i^1(k)\}, k = 1(1)K_i$  – множество терминалов (элементов процессов данного уровня);

$V_{Ni}^2 = \{A_i^1(m)\}, m = 1(1)M_i$  – множество нетерминалов (ситуаций, составных процессов);

– множество продукций грамматики, представленных следующим образом:

$$(P_i^1(n))\alpha_{Ni}^1(n) \rightarrow \alpha_{i2}^1(n),$$

где  $\alpha_{i1}^1(n), \alpha_{i2}^1(n) \in (V_{Ni}^1 \cup V_{Ti}^1), (X)^*$  – итерация множества (X) [9] для произвольной грамматики;

$S_i^2 = A_i^1(1)$  – начальный нетерминал, соответствующий обозначению начального состояния вывода по продукциям грамматики.

Используемые при подобном порождении правила согласования с подобной интерпретацией явно учтены в записи грамматик. Особенно удобна подобная форма структуризации моделей процессов функционирования АСУ ТП, если протоструктуры подпроцессов контроля, моделируемых грамматиками

$$G_i^2 = \langle V_{Ti}^2, V_{Ni}^2, P_i^2, S_i^2 \rangle,$$

определенным образом связаны, и возможна ре-

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

курсивная форма задания элементов множеств одних грамматик через протоструктуры процессов, моделируемых множествами других грамматик в

$$G_l^2 = \langle V_{PI}^2, V_{NI}^2, P_l^2, S_l^2 \rangle,$$

Это делает возможным задание в виде одной грамматики с соответствующими правилами согласования большое (в общем случае бесконечное) число грамматик, описывающих протоструктуры процессов в АСУ ТП.

Важной особенностью подобного применения МГ при анализе и синтезе сложноструктурированных процедур функционирования АСУ ТП АЭС является также возможность интеллектуализированной генерации структур иерархий Саати с использованием не просто знаний опытных экспертов, а с заданием данными экспертами правил формирования иерархических структур отношений Саати (целей, критериев и других важных факторов). Задание правил порождения подобных структур аналогично вышеприведенному при задании в МГ грамматикой  $G$ , порождения графов, соответствующих иерархиям Саати по продукционным метаправилам промаркированных цепочек:

$$\alpha_l^1 = \alpha_1^1 \dots \alpha_l^1, l = 1(1)L,$$

где  $\alpha_l^1 = \alpha_{PI}^1 \alpha_{NI}^1 \alpha_{PL}^1$ ;

и каждая цепочка соответствует иерархии Саати соответствующего уровня [10].

В рамках сетевых метаграмматических описаний возможно установление связей различного типа между моделями процессов функционирования АСУ ТП рассматриваемого класса. В частности, ТР правила согласования соответствующей интерпретации могут определять отношения структуризации моделей [9], а для автоматизированных интеллектуальных процессов информационно-аналитической обработки мониторинговых данных – нечеткие и каузальные отношения, причем использование подобных интерпретаций продукций и правил согласования позволяет существенно расширить набор специфицируемых при моделировании сложноструктурированных ситуаций, функциональных взаимосвязей в рамках задания и анализа структурно-функциональных организаций сложноструктурированных процессов, аналогично [6-10].

При моделировании интеллектуальных процессов информационно-аналитической обработки мониторинговых данных в АСУ ТП для спецификации семантических отношений [9] целесообразно использование атрибутивных метаграмматик и задание соответствующих правил согласования, учитывающих особенности вычисления унаследованных и синтезированных атрибутов.

В целом при использовании в МГ подобных продукций и правил согласования может быть реализована глобальная (по всему комплексу моделей) и локальная интеграция моделей функционирования сложноструктурированных АСУ ТП АЭС.

При задании в МГ стохастических и нечетких мер и атрибутов на множествах продукций грамматик и правилах согласования возможно моделирование в многоуровневых и сетевых метаграмматических моделях отношений релевантности и задание других семантических метрик аналогично [9].

Применение ряда интерпретаций NP правил согласования делает возможным реализацию при использовании моделей и анализе процессов функционирования АСУ ТП принципа активности [9], когда переход в МГ в определенное состояние (порождение определенного нетерминала) в одной грамматике инициирует определенное рода действие (выполнение одной из разрешенных правилами управления и погружения продукций множества  $P$ ) в другой грамматике, входящей в общую многоуровневую или сетевую метаграмматическую модель.

В целом проведенное выше рассмотрение общих аспектов применения МГ в качестве формальной основы продукционных моделей сложноструктурированных процессов функционирования АСУ ТП АЭС показало, что с их помощью возможна реализация большинства особенностей интеграции существующих и перспективных моделей рассматриваемых процессов [9].

При этом сама рекурсивная, основанная на «системах продукционных правил» форма метаграмматических моделей обеспечивает задание основных и в большей части специфических интеграционных отношений, выявленных при формализации задач моделирования сложноструктурированных процессов функционирования существующих и перспективных АСУ ТП АЭС. А за счет структуризации в МГ систем правил увязки моделей, повышается компактность продукционных моделей, возможность их частичной модификации и расширения классов моделируемых процессов по принципам структурного программирования, становится возможным применение эффективных методов грамматического разбора МГ для анализа и синтеза процессов функционирования АСУ ТП рассматриваемого класса. При этом также возможно устранение тупиковых выводов [9], существенно упрощается проверка корректности создаваемых моделей, решение задач машинного обучения и объяснения принимаемых решений.

Таким образом, применение аппарата тео-

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

рии МГ в качестве формальной основы моделирования сложноструктурированных процессов функционирования АСУ ТП, позволяет преодолеть большинство существующих недостатков известных формальных схем, создает теоретический базис для применения эффективных методов анализа и синтеза нового поколения автоматизированных систем управления технологическими процессами существующих и перспективных АЭС.

### Литература

1. IEC 62645. «Nuclear power plants – Instrumentation and control systems – Requirements for security programs for computer-based systems», 2014.
2. IEC 61226:2005. Электростанции атомные. Средства контроля и управления важные для безопасности. Классификация функций контроля и управления.
3. IEC 60987:2007. Электростанции атомные. Средства контроля и управления важные для безопасности. Требования к проектированию аппаратных средств компьютерных систем.
4. Автоматизированные системы управления АЭС/ Ю.К. Атрощенко, Е.В. Иванова. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. 81с.
5. Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики. Т. 2 / под ред. акад. РАН А.А. Саркисова. М.: Академ-Принт, 2015. 387 с.: ил.
6. Атакищев О.И., Козин Ю.Д. Метаграмматики как средство формального описания протоколов // Автоматика и вычислительная техника, 1989, №5, С.11.
7. Atakishchev O.I. Metagrammars and particularities in their application to formal description of signals and protocols // Telecommunication and the Radio Engineering. Vol.62(6), 2004.
8. Атакищев О.И. Метаграмматики и особенности их применения для формального описания сигналов и протоколов документальных служб связи и передачи данных. Части 1, 2 // Телекоммуникации №10, 12. М.: Машиностроение, 2001.
9. Атакищев О.И., Добросердов О.Г. Особенности применения метаграмматик для формального описания структуры сложных организационно-технических систем // Сборник научных статей «Методы и средства систем обработки информации», Мин. общ. и проф. образ. РФ, Курск: КГТУ, 1997, С.5-14.
10. Атакищев О.И. Коллегиальные метаграмматики для моделирования динамично изменяемых программ создания систем информационной безопасности / О.И. Атакищев, И.Л. Борисенков, В.Г. Грибунин, Я.Д. Смирнов // Вестник компьютерных и информационных технологий, 2020. №4(190). С.29-43.
11. Городецкий В.И., Дрожжин В.В., Зверюков Б.В., Новожилин А.В., Полищук Г.М., Юсупов Р.М. Многоуровневые структуры атрибутивных грамматик для моделирования сложных организационных систем и их применение в задачах принятия решений. Научно-технический сборник (труды), 1983, Вып.599. С.1-20.
12. Атакищев О.И., Аджемов С.С., Емельянов С.Г. [и др]. Формальные грамматики, метаграмматики и грамматические структуры. Их применение при принятии управленческих решений. М., МТУСИ, 2010. 345с.
13. Атакищев О.И. Особенности коллегиальных метаграмматик и их использования при решении задач графодинамики / О.И. Атакищев, И.Л. Борисенков, А.Н. Царьков, Я.Д. Смирнов // Сборник материалов XV Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2020. С. 223-226.
14. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1993.
15. Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка принятия решений: Научно-практическое издание. Серия «Информатизация России на пороге XXI века». М.: СИНТЕГ, 1998.
16. Новиков Д.А. Математические модели формирования и функционирования команд. М.: Издательство физико-математической литературы, 2008.
17. Кини Р.А., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1981.
18. Емельянов С.Г., Атакищев О.И., Стребков Д.А., Заичко В.А. Нечеткая многоуровневая модификация метода анализа иерархий и способ определения оценок предпочтительности альтернативных вариантов создания сложных систем космического назначения в условиях повышения неопределенности внешней среды // Известия ЮЗГУ, 2012. №5(44). Ч.2. С.50-60.



# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.056

**ЗАЩИЩЕННОСТЬ ОБЪЕКТА:  
СОБЫТИЙНАЯ МОДЕЛЬ  
УГРОЗ**

**OBJECT SECURITY: EVENT-  
BASED THREAT MODEL**

**Елена Павловна Бутрина**  
начальник ОСПО  
АНО «Институт инженерной физики»  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов,  
Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7 (916) 245-98-82  
E-mail: kenga48@yandex.ru

**Владимир Петрович Олейников**  
кандидат физико-математических наук,  
доцент  
старший эксперт ОСПО  
АНО «Институт инженерной физики»  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов,  
Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: 8 (916) 576-18-39  
E-mail: vpoleinikov@mail.ru

## Аннотация

Статья посвящена разработке системы понятий, призванной обеспечить построение формальной модели защищенности объекта на основе объектного и событийного подходов. В рамках этих подходов формализованы понятия уязвимости и вреда, опасности и угрозы, а также барьера. Построены формальные модели защищаемого объекта, источника угроз и системы защиты.

**Ключевые слова:** защищенность объекта, угроза, уязвимость, модель атаки, модель угроз.

## Summary

The article is devoted to the development of a system of concepts designed to ensure the construction of a formal model of object security based on object and event approaches. Within the framework of these approaches, the concepts of vulnerability and harm, danger and threat, as well as a barrier are formalized. Formal models of the protected object, the source of threats and the protection system are constructed.

**Keywords:** object security, threat, vulnerability, attack model, threat model.

**Перечень сокращений:** ЗО – защищаемый объект; ИУ – источник угроз(ы); КМ – концептуальная модель; ММ – математическая модель; ОО – опасный объект; СФС – структурная функция системы [2].

## Базовые понятия

Для приложения рассмотренных ранее [1, 2] методов к разработке модели защищенности следует связать введенные понятия с соответствующими понятиями предметной области. ГОСТ [4,5] определяет эти понятия так:

• 3.6. *угроза безопасности информации:* совокупность условий и факторов, создающих потенциальную или реально существующую опасность нарушения безопасности информации.

• 3.7. *уязвимость:* недостаток (слабость) программного (программно-технического) средства или информационной системы в целом, который(ая) может быть использован(а) для реализации угроз безопасности информации.

Определение МЧС [9] более конструктивно:

• *Уязвимость* – свойство объекта утрачивать способность к выполнению своих естественных

или заданных функций в результате негативных внешних воздействий.

Методические указания ФСБ [8] определяют атаку так:

• *Атака* – целенаправленные действия нарушителя с использованием технических и (или) программных средств с целью нарушения заданных характеристик безопасности защищаемой криптосредством информации или с целью создания условий для этого.

Учебный курс [7] более конструктивен:

• *Угроза* – потенциально возможное событие, явление или процесс, которое посредством воздействия на компоненты [информационной] системы может привести к нанесению ущерба.

• *Уязвимость* – любая характеристика или свойство [информационной] системы, использование которой нарушителем может привести к реализации угрозы.

• *Атака* – любое действие нарушителя, которое приводит к реализации угрозы путем использования уязвимостей [информационной] системы.

В рамках применяемого нами объектного

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

подхода эти понятия естественно обобщаются на объекты любого вида. Уточним их с точки зрения событийного подхода.

### Защищенность

Защищенность ЗО  $s$  (от *security, shield* – защита) как его свойство может принимать два значения:

- $s=1$  (TRUE, ИСТИНА, ...) – защищенность ЗО нарушена;
- $s=0$  (FALSE, ЛОЖЬ, ...) – защищенность ЗО НЕ нарушена.

Основным событием для нас является  $E_s=(s=0; s=1; X_s)$  (рисунки 1).

При таком определении  $s$  совпадает с индикатором  $I_0$  события  $E_s$ . Вероятность  $P_s \in [0; 1]$  события  $E_s$  с мерой защищенности  $Z_s$  связана соотношением  $Z_s=P(NE(E_s))=1-P_s$ . Значение  $Z_s=1$  соответствует состоянию полной (высшей) защищенности,  $Z_s=0$  – полной незащищенности.

### Уязвимость и вред

Событие  $E_s$  требует, как было указано ранее [2], описания состояния  $s=1$  как перечня тех свойств ЗО, которые могут принимать нежелательные значения. Каждое такое свойство ЗО есть его *уязвимость*  $v$  (*vulnerability*). Переход ЗО в нежелательное состояние (из-за использования нарушителем уязвимости) есть событие  $E_v=(v=0; v=1; X_v)$ , реализуемое с некоторой вероятностью  $P_v$ . Состояние  $v=0$  означает, что уязвимость  $v$  не использована (пока!).

Нежелательное состояние характеризуется тем, что при переходе в него ЗО наносится некоторый *вред*  $h$  (*harm*). Это обстоятельство можно записать в виде произведения событий  $X_v$  (использована уязвимость  $v$ ) и  $X_{h|v}$  (при использовании уязвимости  $v$  нанесен вред  $h$ ). Тогда имеем соотношения [3]:

$$X_v = X_h \cdot X_{h|v}, \quad I(v) = I(h) \cdot I(h|v), \\ (v) \equiv P(v \cdot h) = P(h) \cdot P(h|v).$$

Будем полагать нанесение вреда обязательной и финальной стадией реализации угрозы:  $S_{Finish} \equiv S_h$  (рисунки 2). Тогда событие  $X_{h|v}$  является достоверным, поэтому  $I(h|v) \equiv 1$  и  $P(h|v) \equiv 1$ .

Элементы  $X_{h|v}$  и  $h$  присутствуют всегда, поэтому они выделены пунктиром. Далее мы их будем, для краткости, опускать.

При оценке наносимого *ущерба* (*damage, harm*) событие  $X_{h|v}$  имеет некоторый вес, равный величине нанесенного ущерба, и в соответствующем

графе надо учитывать опускаемые сейчас элементы. Полученные оценки ущерба можно использовать для разработки мер по повышению защищенности ЗО (мы предполагаем обсудить эти вопросы далее).

Уязвимостям посвящено много материалов – и в профессиональной литературе, и в интернете [11]. При разработке модели угроз конкретного ЗО источником данных об уязвимостях может служить база данных ФСТЭК [10] и другие аналогичные источники.

### Опасность и угроза

Одно из базовых понятий, используемых при построении КМ защищенности – *опасность*  $d$  (*danger*) как любое явление, угрожающее ЗО. В широком смысле слова опасность – это возможность неблагоприятного (негативного) воздействия источника угрозы (ИУ) на ЗО, которое может придать свойствам ЗО нежелательные значения. Наличие опасности как объекта еще не означает, что ЗО наносится вред. То есть,  $OO \neq ИУ$ , и опасность – это еще не угроза. Например, пистолет в кобуре – это опасность (ОО), а пистолет в руке – это уже угроза (ИУ).

Чтобы опасность стала угрозой, нужно еще выполнение некоторых условий в виде реализации некоторых событий  $C$ . Иными словами, *угроза*  $t$  (*threat*) как событие есть произведение двух событий – появления опасности в виде  $OO$  ( $X_d$ ) и выполнения комплекса условий ( $X_C$ ). Тогда опасность и угроза связаны соотношениями

$$X_t = X_d \cdot X_C, \quad I(t) = I(d) \cdot I(C), \\ P(t) \equiv P(d \cdot C) = P(d) \cdot P(C|d),$$

где условная вероятность  $P(C|d) \equiv P(t|d)$  равна вероятности перехода имеющейся опасности  $d$  в угрозу  $t$ .

Поскольку все случайные события рассматриваются при наличии некоторого фиксированного комплекса условий, то и вероятность  $P(d)$  тоже может быть записана через условную вероятность. Такая цепочка, вообще говоря, бесконечна – и ее надо где-то оборвать. Для этого положим, что событие  $X_d$  есть достоверное событие:  $P(d) \equiv 1, I(d) \equiv 1$ . То есть, мы полагаем, что

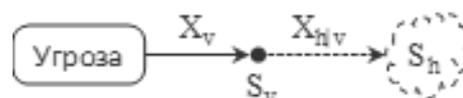


Рис. 2. Орграф «уязвимость – вред»

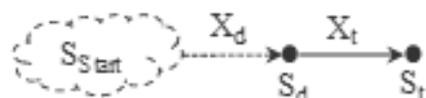


Рис. 3. Орграф события «Опасность стала угрозой»

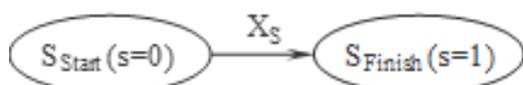


Рис. 1. Орграф события  $E_s$

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

опасность есть всегда, но она переходит в угрозу с некоторой вероятностью  $P(t)$ , причем именно разработчик событийной модели угроз решает, что считать опасностью, а что угрозой. Тогда  $X_t = X_C$ ,  $I(t) = I(C)$ ,  $P(t) \equiv P(C)$ , и соответствующий оргграф имеет вид (рисунки 3).

Таким образом, ИУ есть множество только тех свойств ОО, которые могут (в принципе!) придать уязвимости  $v$  нежелательное значение и поэтому являются угрозами. Угрозы и уязвимости как объекты можно подвергать дальнейшему анализу, выстраивая структуры с использованием ранее разработанных фрагментов как подсистем.

Перечень угроз можно найти в [6,10].

### Событийная модель атаки. Базовая модель

«Подставляя» графы на рисунках 2 и 3 в 1, получим базовую модель атаки (рисунки 4).

На рисунке 4 выделены три состояния:

- $S_d$  – состояние «Наличие ОО d»;
- $S_t$  – состояние «Угроза t актуализована» (появился ИУ);
- $S_v$  – состояние «Через уязвимость  $v$  нанесен вред [h]».

Как видим, воздействие ОО → ИУ → ЗО состоит из двух случайных событий:

- $X_t$  – возникновения (реализации) угрозы  $t$  (из всегда присутствующей опасности  $d$ ) и
- $X_v$  – воздействия угрозы  $t$  на уязвимость  $v$  (нанесения вреда через  $v$ ).

#### Пример.

- ОО = Нарушитель;
- угроза  $t$  = Умение взламывать пароль (свойство ИУ = Хакер);
- уязвимость  $v$  = Пароль (свойство ЗО = Данные);
- атака  $a(t, v)$  = Хакер взломал пароль.

Для такой последовательности событий термин атака  $a_{t,v}$  вполне естественен. Поскольку вероятность события  $X_0$  нам заранее не известна, то для ее вычисления надо построить модель атаки, которая позволит выразить событие  $X_0$  через другие события, уже элементарные. Будем полагать эти события независимыми, тогда  $X_0 = X_t \cdot X_v$ ,  $P_0 = P_t \cdot P_v$ .

Такая факторизация угрозы позволяет более точно описать стадии ее формирования и реализации – перехода от потенциальной опасности  $d$  при реализации событий к возникновению

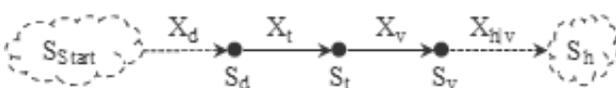


Рис. 4. Базовая модель атаки

реальной угрозы  $t$ , которая уже оказывает негативное воздействие на уязвимость  $v$ . Поэтому, с т.зр. событийного подхода, развитие угрозы есть сценарий, при котором последовательность воздействий «по ходу дела» переводит ЗО из одного состояния в другое.

### Барьеры

Назовем (в рамках нашей задачи) барьером любой объект (свойство), использование которого необходимо для реализации угрозы. Функцией (целью) барьера является снижение вероятности реализации угрозы. Поэтому барьер  $b$  можно рассматривать как свойство ЗО с двумя состояниями (рисунки 5):

- $b=0$  – (FALSE, ЛОЖЬ, ...) – Нарушитель барьер  $b$  НЕ преодолел;
- $b=1$  – (TRUE, ИСТИНА, ...) – Нарушитель барьер  $b$  преодолел.

Отметим, что при этом защищенность  $s=0$ , поскольку  $s=1$  только после события  $X_v$ .

Для снижения вероятности  $P_0$  на пути нарушителя организуют ряд барьеров  $b_m$ ,  $m=1...M$ . По мере развития атаки происходит последовательный ряд событий  $X_{b_m}$  = Нарушитель преодолел барьер  $b_m$ , и логически атака есть произведение событий

$$X_{a_{t,v}} = X_t \cdot X_{b_1} \cdot X_{b_2} \cdot \dots \cdot X_{b_M} \cdot X_v = \bigwedge_{(a_{t,v})} X_i,$$

где кортеж  $(a_{t,v})$  описывает линейную последовательность событий (рисунки 6).

Здесь состояние  $S_{b_m}$  есть состояние ЗО после того, как угроза в процессе своей реализации преодолела барьер  $b_m$ .

### Событийная модель защищенности. Система атак

Как уязвимостей, так и угроз может быть много, поэтому введем множества уязвимостей  $V \equiv \{v\}$ , угроз  $T \equiv \{t\}$  и атак  $A \equiv \{a_{t,v}\}$  с мощностями  $N_v, N_t, N_A$  соответственно. Эта тройка дает математическую модель защищенности объекта (системы угроз):  $\{V, T, A\}$ . С т. зр. теории множеств, эта модель описывает соответствие  $A$ , заданное на декартовом произведении множеств  $TV$ , и представляется дуальным ориентированным графом (рисунки 7).

Для компактности состояния обозначаются

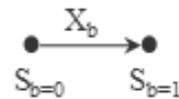


Рис. 5. Модель барьера

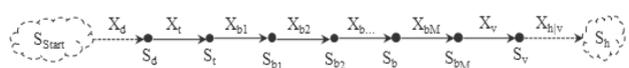


Рис. 6. Граф линейной атаки

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

символами событий, которые приводят к этому состоянию. К подразумеваемым элементам мы добавили и множество событий  $\{d\}$ . Вершины  $t, j \in T, j=1 \dots N_T$  отображают множество угроз ИУ, вершины  $v, n \in V, n=1 \dots N_V$  отображают множество уязвимостей ЗО. Поэтому множество  $V$  есть ММ ЗО, а множество  $T$  – ММ ИУ. Каждая дуга орграфа описывает атаку  $a(t, j; v, n) \in A$  как событие  $X_{t,v} = (\text{Угроза } t, j \text{ успешно воздействует на уязвимость } v, n)$ .

Но эта схема не учитывает систему защиты, состоящую из множества барьеров (рис. 8).

Так как (а) одна угроза может воздействовать на несколько уязвимостей, (б) одна уязвимость может подвергаться воздействию нескольких угроз, (в) один и тот же барьер может противодействовать различным атакам, то эта система угроз делает задачу построения адекватной математической модели весьма сложной. Поэтому следует ожидать, что расчеты на ее основе дадут сколько-нибудь практические результаты лишь при компьютерной поддержке и применении имитационного моделирования.

### Несовместные сценарии

Анализ структур событий при строгой дизъюнкции, квазипараллельных событий и мостиковой схемы показывает, что важную роль в них играют события, которые входят вместе со своими отрицаниями – они являются своеобразными переключателями сценариев.

Например, в мостиковой схеме реализация события  $X_5$  включает сценарий  $Y_1$ , а его не реализация  $X_5'$  – сценарий  $Y_2$ . В схеме строгого ИЛИ для двух событий событие  $X_1'$  включает сценарий  $X_2$ , а  $X_2'$  –  $X_1$ . В много событийной схеме строгого ИЛИ (случай квазипараллельной структуры с условием «только 1 из N») ключом для запуска сценария  $X_i$  является произведение отрицаний всех остальных событий. Еще более запутанным выглядит СФС для прочих квазипараллельных структур.

Если рассматриваемые сценарии несовместны, то их можно рассматривать как гипотезы  $H_l, l=0 \dots L$  с вероятностью реализации  $P(H_l)$ . Тогда  $P(X_0)$  можно вычислить по формуле полной ве-

$$P(X_0) = \sum_{l=1}^L P(H_l) \cdot P(X_0 | H_l).$$

Поскольку сумма вероятностей гипотез равна 1, то среди них обязательно есть «нулевой» сценарий  $H_0 = (\text{На ЗО не произведено ни одной атаки})$ . Поскольку  $P(X_0 | H_0) = 0$ , то это слагаемое можно просто опустить:

$$P(X_0) = \sum_{l=1}^L P(H_l) \cdot P(X_0 | H_l) \quad (1)$$

Каждое слагаемое в (1) есть вероятность реализации некоторой атаки, равную произведению двух независимых событий – выбора сценария  $H_l$  с вероятностью  $P(H_l)$  и вероятности  $P(X_0 | H_l)$  нарушения защищенности ЗО при этом сценарии.

Отметим, что для планируемой атаки на конкретную уязвимость  $v$  последовательность событий обычно жестко задана, поэтому «переключение» на другую последовательность событий маловероятно. Поэтому, скорее всего, структура атак (в смысле СФС) на практике будет простой.

### Иерархия моделей угроз

Если ЗО есть представитель некоторого класса, свойства которого описаны как качественные характеристики, то его КМ носит абстрактный характер. Получаемая при этом ММ угроз описывает, в основном, базовые структуры событий, адаптированные к данному классу объектов. Рекомендации в таком случае поневоле носят обобщенный характер.

Если ЗО – реальный объект, то и КМ, и ММ могут быть доведены «до числа», пусть даже эти числа носят характер оценок. Такая модель носит частный характер.

В зависимости от уровня абстрактности КМ мы получаем ряд «вложенных» моделей, образующих некую иерархию, что позволяет быстро их модифицировать – наполнять конкретикой, переносить результаты на другие ЗО и многое другое.

### Развитие модели защищенности

При построении модели угроз необходимо опи-

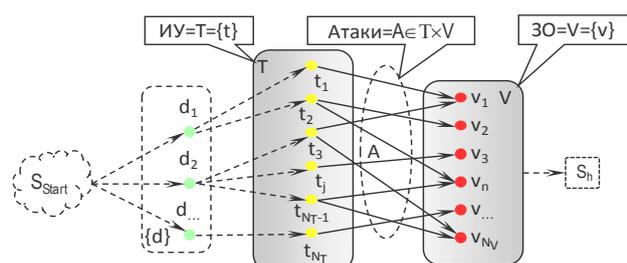


Рис. 7. Дуальный орграф системы угроз

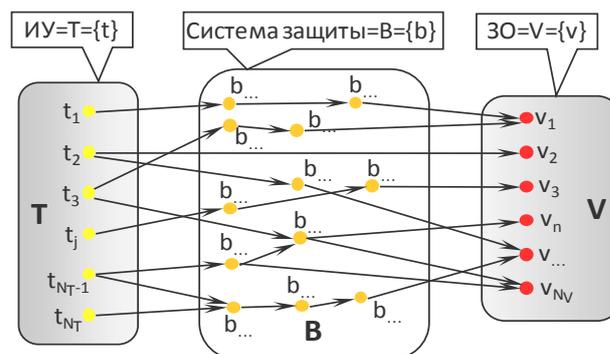


Рис. 8. Система угроз для ЗО

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

сать все ее объекты. Это требует создания базы данных БД, содержащей данные об уязвимостях ЗО (и его составных частей), различных ИУ и несомых ими угрозах, сценариях атак и т.п. Содержание БД должно описывать объекты, их свойства и значения этих свойств как иерархической структуры. В качестве свойств состояния можно включить допустимое время пребывания в нем, степень конфиденциальности, необходимость объявления тревоги и пр. Такая БД позволяет модифицировать модель при изменении ЗО – дополнять ее новыми уязвимостями, изменять параметры угроз и атак, планировать меры защиты и решать многие другие задачи защиты объекта (оценка ущерба и т.п.).

### Литература

1. Бутрина Е.П., Олейников В.П. Защищенность – объекты и события // Известия Института инженерной физики, 2021. №2(60). С.86-90.
2. Бутрина Е.П., Олейников В.П. Защищенность объекта: структуры событий и сценарный подход // Известия Института инженерной физики, 2021. №3(61). С.55-60.
3. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М., Высшая школа, 2003. 479 с.
4. ГОСТ Р 56545-2015. Защита информации. Уязвимости информационных систем. Правила

описания уязвимостей.

5. ГОСТ Р 56546-2015. Защита информации. Уязвимости информационных систем. Классификация уязвимостей информационных систем.
6. Каталоги угроз [Электронный ресурс]. <https://itnan.ru/post.php?c=1&p=351326#catubi> (актуальна на 12.07.2022).
7. Курс «Безопасность информационных технологий» [Электронный ресурс]. Тема 24: Угрозы, уязвимости и атаки в сетях. <http://asher.ru/security/book/its/24> (актуальна на 20.10.2021).
8. Методические рекомендации по обеспечению с помощью криптосредств безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных с использованием средств автоматизации (утв. ФСБ РФ 21 февраля 2008 г. N 149/54-144).
9. Термины МЧС России [Электронный ресурс]. <https://www.mchs.gov.ru/ministerstvo/o-ministerstve/terminy-mchs-rossii/term/2016> (актуальна на 20/10/2021).
10. ФСТЭК России. Банк данных угроз безопасности информации [Электронный ресурс]. <https://bdu.fstec.ru/> (актуальна на 20/10/2021).
11. Уязвимости [Электронный ресурс]. <https://www.securitylab.ru/vulnerability/> (актуальна на 12.07.2022).

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 52.65

## МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ СЛАБЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ НА РЕГИОНАЛЬНЫХ РАССТОЯНИЯХ НА ПРИМЕРЕ СТАНЦИИ МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА NVAR

## METHOD OF IDENTIFICATION OF WEAK SEISMIC SOURCES AT REGIONAL DISTANCES ON THE EXAMPLE OF THE STATION OF THE INTERNATIONAL MONITORING SYSTEM NVAR

### Вадим Вячеславович Юшин

кандидат технических наук  
начальник 1 отдела 1 центра  
научно-исследовательского (специального контроля)  
ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России  
Адрес: 141300, Московская обл., г. Сергиев Посад-7,  
ул. Весенняя, д. 26  
Тел.: +7 (915) 183-96-95  
E-mail: fgu12tsnii@mail.ru

### Антон Николаевич Мамонтов

кандидат технических наук  
ведущий научный сотрудник 1 центра  
научно-исследовательского (специального контроля)  
ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России  
Адрес: 141300, Московская обл., г. Сергиев Посад-7,  
ул. Весенняя, д. 26  
Тел.: +7 (966) 112-66-99  
E-mail: fgu12tsnii@mail.ru

### Лариса Викторовна Макарова

младший научный сотрудник 1 отдела 1 центра  
научно-исследовательского (специального  
контроля)  
ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России  
Адрес: 141300, Московская обл.,  
г. Сергиев Посад-7,  
ул. Весенняя, д. 26  
Тел.: +7 (965) 238-65-62  
E-mail: fgu12tsnii@mail.ru

### Руслан Адамович Турбал

кандидат технических наук  
начальник кафедры информационно-  
измерительных систем контроля  
за ядерными взрывами  
филиал ВА РВСН им. Петра Великого  
(г. Серпухов)  
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,  
ул. Бригадная, д. 17  
Тел.: +7 (916) 808-54-29  
E-mail: rusladatur@mail.ru

### Владислав Олегович Медведев

курсант  
филиал ВА РВСН им. Петра Великого  
(г. Серпухов)  
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,  
ул. Бригадная, д. 17  
Тел.: +7 (985) 025-09-01  
E-mail: varvsn-serp@mail.ru

### Аннотация

В статье обобщены материалы наблюдений сейсмической станцией Международной системы мониторинга (МСМ) «Майна» (NVAR) за сейсмическими событиями в районе южной части штата Невада, США. На основании большого количества экспериментальных данных предлагается метод распознавания землетрясений и специальных взрывов (СВ), основанный на построении зависимостей дискриминантов идентификации от расстояния в узкой полосе фильтрации. Данный метод может быть использован для распознавания СВ и землетрясений для произвольных районов земного шара.

**Ключевые слова:** идентификация, землетрясение, специальный взрыв.

### Summary

The article summarizes the materials of observations by the seismic station of the International Monitoring System (IMS) «Maina» (NVAR) for seismic events in the southern part of Nevada, USA. Based on a large amount of experimental data, a method for recognizing earthquakes and special explosions (SE) is proposed, based on the construction of the dependencies of the identification discriminants on the distance in a narrow filtration band. This method can be used to recognize SE and earthquakes for arbitrary regions of the globe.

**Keywords:** identification, earthquake, special explosion.

Идентификация (распознавание) специальных взрывов (СВ) и землетрясений, обнаруженных сетью сейсмических станций, является одной из ключевых проблем сейсмологии. Это об-

условлено наличием в реальной среде строения Земли многочисленных границ раздела, тектонических нарушений и неоднородностей, что приводит к существенному искажению сигнала

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

на пути распространения до станции. Определенные проблемы при идентификации СВ и землетрясений вносят также многочисленные промышленные химические взрывы [1].

Таким образом, для эффективного распознавания типа зарегистрированного сейсмического явления, необходимо по некоторому набору параметров сейсмических сигналов выбрать наиболее информативные и на их основе сформировать диагностические параметры (дискриминанты), которые характеризовали бы источник и не зависели от силы явления и свойств среды на всем пути распространения сигналов от источника до станции.

Для решения задачи идентификации сейсмических источников необходима разработка универсального метода, позволяющего на основе экспериментальных данных района, по которому имеются характеристики по СВ и землетрясениям (опорный район) проводить обоснование дискриминантов и критериев идентификации для произвольных (контролируемых) районов.

При идентификации сигналов от СВ и землетрясений по разным критериям применяется вероятностная статистическая процедура классификации с использованием правила Байеса для принятия решения о принадлежности явления к тому или иному классу.

В этом случае процедура классификации заключается в отнесении объекта, для которого наблюдается вектор  $\bar{x} = (x_1, \dots, x_n)$ , к одной из двух совокупностей:  $H_1$  (СВ) или  $H_2$  (землетрясения).

Если известны априорные вероятности  $p$  и  $q$  гипотез  $H_1$  и  $H_2$ , а также плотности вероятности наблюдаемого вектора  $f_1(\bar{x})$  и  $f_2(\bar{x})$ , то условная вероятность того, что верна гипотеза  $H_1$  при условии, что вектор параметров принял значение  $\bar{x}$ , равна [1]:

$$P\left(p, \frac{H_1}{\bar{x}}\right) = \frac{pf_1(\bar{x})}{pf_1(\bar{x}) + qf_2(\bar{x})}, \quad (1)$$

где  $p$  и  $q$  – априорные вероятности гипотез  $H_1$  и  $H_2$ .

Гипотеза  $H_1$  принимается, если

$$P(p, H_1 / \bar{x}) \geq (P_0)_{\text{пор}}, \quad (2)$$

и гипотеза  $H_2$ , если

$$P(p, H_1 / \bar{x}) < (P_0)_{\text{пор}}, \quad (3)$$

где  $(P_0)_{\text{пор}}$  – пороговое значение вероятности  $P(p, H_1 / \bar{x})$ .

Плотности вероятностей  $\varphi_1(D[(x_1), \dots, (x_n)])$  и  $\varphi_2(D[(x_1), \dots, (x_n)])$ , определялись на основе гистограмм распределения значений дискриминантов  $D_{\text{ид}}$ .

Значения дискриминантов  $D_{\text{ид}}$  определяются по формуле:

$$D_{\text{ид}} = \lg \frac{A_{Lg}}{A_{Pn}}, \quad (4)$$

где  $D_{\text{ид}}$  – дискриминант идентификации; для вертикального канала ВЗЗ:

$A_{Lg}$  – максимальная амплитуда  $Lg$ -волны в диапазоне частот  $\Delta f = 6-8$  Гц;

$A_{Pn}$  – максимальная амплитуда  $Pn$ -волны в диапазоне частот  $\Delta f = 6-8$  Гц.

При использовании данной процедуры для распознавания СВ и землетрясений необходимо учитывать, что чрезвычайно трудно получить многомерные плотности вероятностей  $f_1(\bar{x})$  и  $f_2(\bar{x})$ , поэтому могут быть использованы одномерные плотности вероятностей при условии, что параметры  $x_1, \dots, x_n$  слабо коррелированы и имеют одинаковый знак корреляции в обоих классах распознаваемых явлений (в данном случае – СВ и землетрясений).

В работах [1-4] высказано предположение, что поскольку для конкретной станции за определенный промежуток времени частоту проявления землетрясений можно оценить, а частота проявления СВ оценке не поддается, то условно можно считать  $p = q = 0,5$ .

В этом случае формула (1) примет следующий вид:

$$P\left(p, \frac{H_1}{\bar{x}}\right) = \frac{f_1(\bar{x})}{f_1(\bar{x}) + f_2(\bar{x})}, \quad (5)$$

Если при идентификации используется информация нескольких станций, то расчет сетевой вероятности идентификации  $P_{\text{ид.сет.}}$  производится по формуле:

$$P_{\text{ид.сет.}} = \frac{\prod_{i=1}^n P[(p, H_1 / D_{\text{ид}i})]}{\prod_{i=1}^n P[(p, H_1 / D_{\text{ид}i})] + \prod_{i=1}^n \{1 - P[(p, H_1 / D_{\text{ид}i})]\}}, \quad (6)$$

где  $P_{\text{ид.сет.}}$  – сетевая вероятность отнесения сейсмического источника к классу СВ или землетрясений;

$P[(p, H_1 / D_{\text{ид}i})]$  – вероятность того, что гипотеза  $H_1$  отнесения сигнала к СВ верна при условии, что дискриминант на  $i$ -ой станции принял значение  $D_{\text{ид}i}$ ;

$n$  – количество станций, на которых проведено определение дискриминанта идентификации.

В настоящей статье особое внимание уделено методу амплитудных отношений  $Pn$ - и  $Lg$ -волн как наиболее эффективному и универсальному методу распознавания СВ и землетрясений. Использованы результаты регистрации сейсмических событий из района южной части штата Невада (США) американской станцией МСМ NVAR.

Анализ результатов регистрации сигналов сейсмических источников для станции МСМ NVAR, показал, что наилучшие результаты обеспечивают использование  $Pn$ - и  $Lg$ -волн в диапазоне частот  $\Delta f = 6-8$  Гц, это подтверждается данными на рисунке 1.

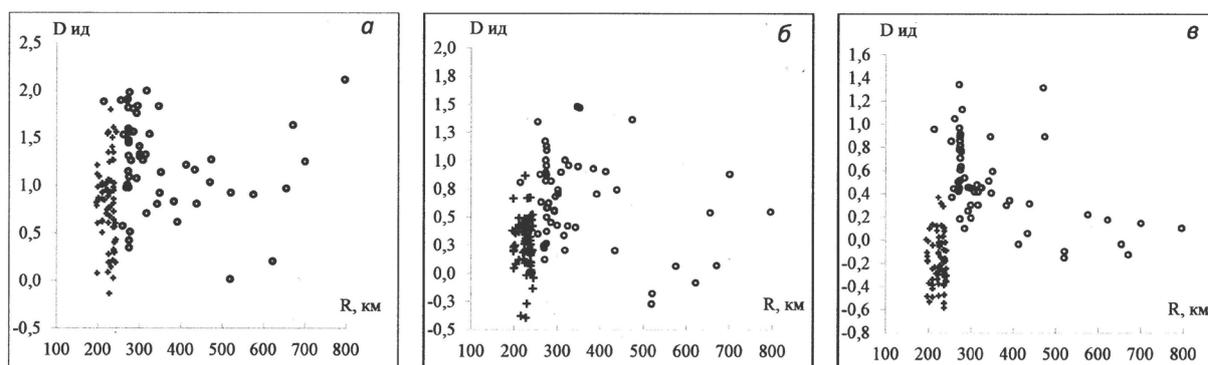
## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Использование результатов регистрации станции NVAR позволило получить зависимости изменения дискриминантов идентификации от расстояния в указанном частотном диапазоне на расстояниях 200-800 км для станции NVAR (рисунк 2).

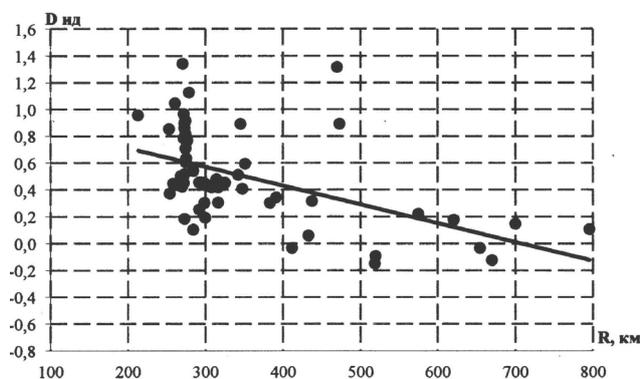
Результатом применения зависимости, представленной на рисунке 2, явилось получение гистограмм распределения значений  $D_{ид}$  от землетрясений и построение частных условий вероятностей для станции NVAR.

нов земного шара, который в виде обобщенного алгоритма представлен на рисунке 4.

Таким образом, предложенный в статье метод идентификации сейсмических источников, произошедших в южной части штата Невада, на основе использования информации, получаемой от станции MCM NVAR, может быть использован для распознавания СВ и землетрясений на региональных расстояниях в различных регионах земного шара, в том числе в районах без предыстории СВ.



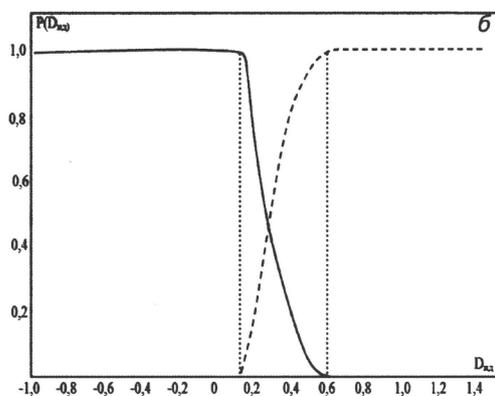
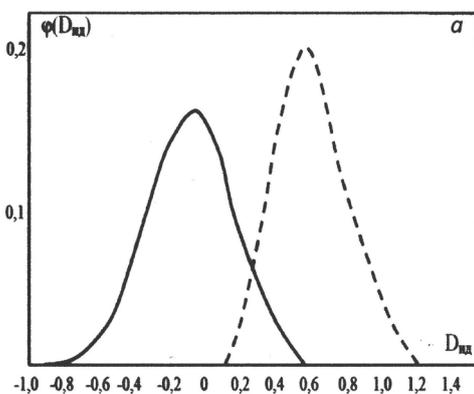
**Рис. 1.** Распределение значений дискриминантов идентификации для СВ и землетрясений (станция NVAR, а –  $\Delta f=0,8-4,5$  Гц, б –  $\Delta f=1,75-3,5$  Гц, в –  $\Delta f=6-8$  Гц)



**Рис. 2.** Зависимость значений дискриминантов идентификации  $D_{ид}$  от расстояния (станция NVAR,  $\Delta f=6-8$  Гц)

Зависимости плотностей распределения  $\varphi_1(D_{ид})$  и  $\varphi_2(D_{ид})$ , а также частных условий вероятностей  $P_{ид}$  от величины  $D_{ид}$  (при условии  $p=q=0,5$ ) для СВ и землетрясений, произошедших в районе штата Невада (опорный район), показаны на рисунке 3, а численные значения критериев идентификации, которые предлагается использовать для разделения СВ и землетрясений, на основе сейсмических сигналов, регистрируемых на станции NVAR приведены в таблице 1.

На основе полученных результатов предложен метод идентификации для различных райо-



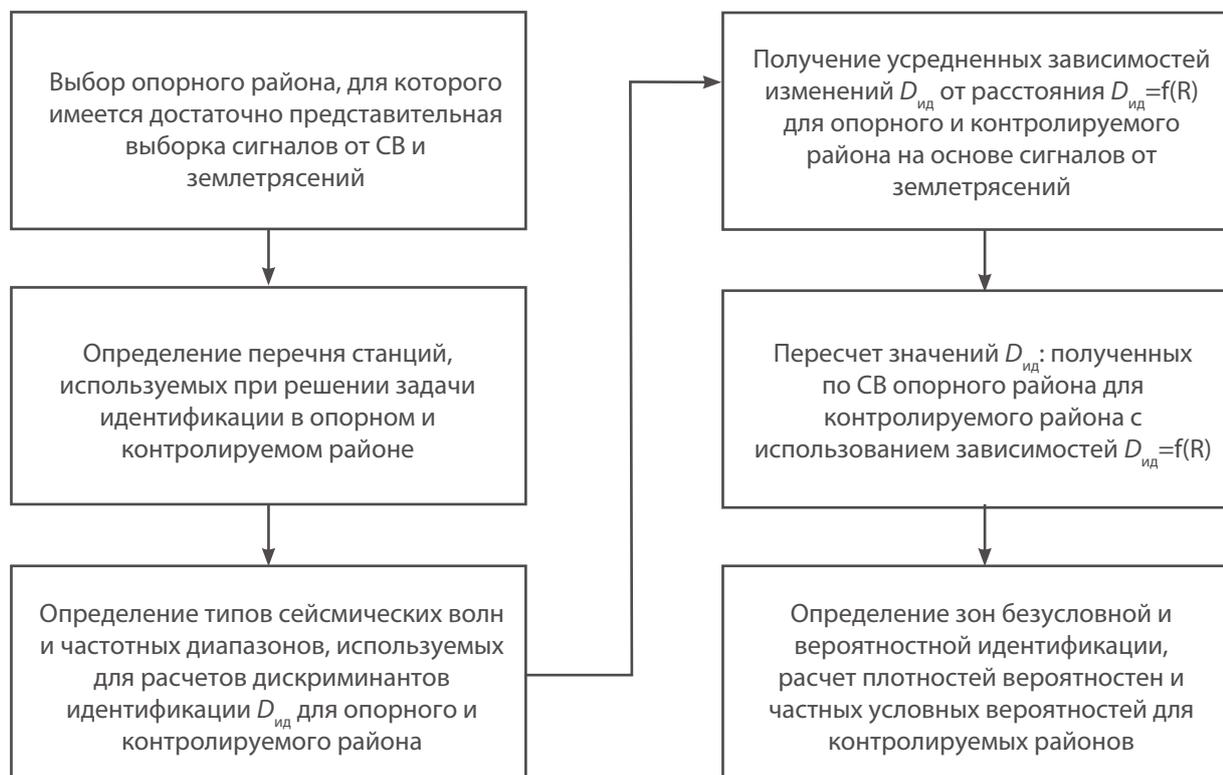
**Рис. 3.** Плотности вероятностей значений дискриминантов  $D_{ид}$  (а) и частотные условия вероятностей гипотез  $H_1$  и  $H_2$  (б) (станция NVAR,  $\Delta f=6-8$  Гц)

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

**Таблица 1**

Значения критериев идентификации СВ и землетрясений в районе южной части штата Невада (США), по данным станции NVAR

Станция	$\Delta f$ , Гц	Критерий безусловной идентификации $D_{ид}$		Область вероятностей идентификации
		СВ	Землетрясения	
NVAR	6-8	$D_{ид} \leq 0,1$	$D_{ид} \geq 0,6$	$0,1 < D < 0,6$



**Рис. 4.** Обобщенный алгоритм метода идентификации СВ и землетрясений для различных районов земного шара

## Литература

1. Кедров О.К. Сейсмические методы контроля ядерных испытаний / Институт физики земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Институт стратегической стабильности Министерства РФ по атомной энергетике. М.; Саранск: Тип. «Красный октябрь», 2005. 420 с.
2. Мамсуров М.С., Пешков А.Б., Пешкова И.В., Глухов А.Г., Юдин Н.Н. Оценки возможностей

- сетей сейсмических станций по обнаружению и местоопределению ядерных взрывов / Физика ядерного взрыва. Т.5. М.: Изд-во физ.-мат. лит-ры, 2017. С.60-96.
3. Адушкин В.В., Спивак А.А. Подземные взрывы. М.: Наука, 2007. 580 с.
4. Аптикаев Ф.Ф. Сейсмические колебания при землетрясениях и взрывах. М.: Наука, 1969. 104 с.

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.932.2

## СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗГОРАНИЙ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ

## WAYS TO IDENTIFY FIRES IN IMAGES

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

**Илья Игоревич Бураков**  
студент магистратуры  
кафедры «Системы обработки информации»  
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана  
Адрес: 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2  
Тел.: 8 (960) 523-37-34  
E-mail: burakovii@student.bmstu.ru

### Аннотация

В статье рассмотрены методы определения возгораний на изображениях с помощью извлечения признаков из изображения, нейронных сетей и специальных камер, их достоинства и недостатки. Представлены метрики моделей обнаружения возгораний, как обнаружения объектов.

**Ключевые слова:** обнаружение возгораний, дискретный оператор Лапласа, LBP, SVM, нейронная сеть, классификация изображений, обнаружение объектов, семантическая сегментация.

### Summary

This article describes methods for detecting fires in pictures using image feature extraction, neural networks and special cameras, their advantages and disadvantages. Metrics of fire detection models as object detection are presented.

**Keywords:** fire detection, Laplacian operator, LBP, SVM, neural network, image classification, object detection, semantic segmentation.

### Введение

Обнаружение возгораний представляет собой особо важную задачу для предотвращения крупномасштабных пожаров в промышленных зонах и населенных пунктах.

Традиционные детекторы дыма обнаруживают физическое присутствие частиц дыма. Однако область их применения имеет ряд ограничений, и решение с видеокamerой может дополнить традиционный детектор.

Включение интеллектуальных видеотехнологий в существующую инфраструктуру камер наблюдения обеспечивает более быстрое время отклика по сравнению с традиционными аналоговыми детекторами дыма. В данной работе рассмотрены преимущества и недостатки различных методов обнаружения задымления на видеоизображениях в реальном времени.

### 1. Анализ изображений

Одними из способов определения возгораний являются алгоритмы анализа изображений. Такие алгоритмы характеризуются простотой

реализации и быстрым временем отклика.

#### 1.1. Определение возгораний и дыма, как снижение резкости изображения

Меру резкости можно вычислить, применив дискретный оператор Лапласа к исходному изображению и затем рассчитав среднееквадратическое отклонение [1]. Мера резкости будет снижаться у изображений, на которых нечетко видны края. Также она уменьшается, если на изображении запечатлен дым (рисунки 1) [2].



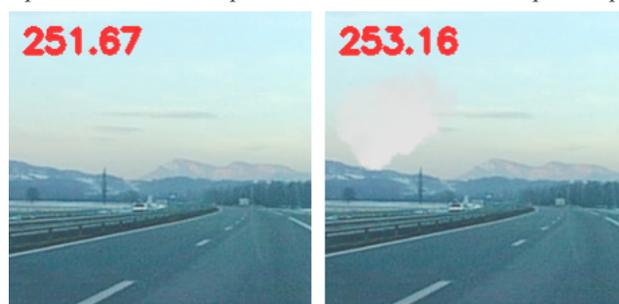
Рис. 1. Сравнение меры резкости изображений с дымом и без

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

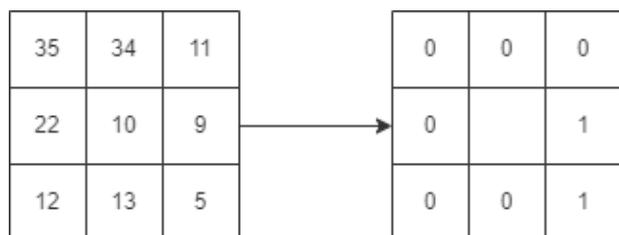
В качестве недостатков данного метода следует отметить снижение резкости, проявляющееся во время дождя, а также случайное повышение рассматриваемого параметра при появлении густого дыма возле объектов, лишенных четко выраженных границ или в безоблачном небе, как представлено на *рисунке 2*.

### 1.2. Локальные бинарные шаблоны

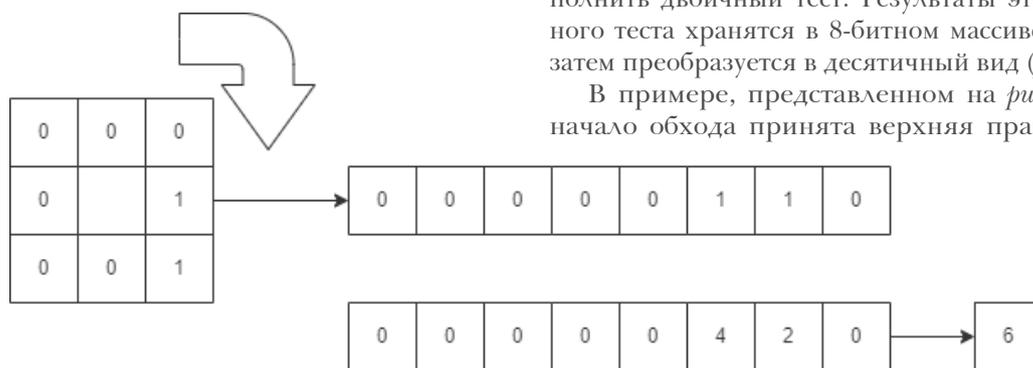
Локальные бинарные шаблоны [3], или сокращенно LBP, представляют собой дескриптор



**Рис. 2.** Сравнение меры резкости изображений с дымом и без



**Рис. 3.** Пример дескриптора



**Рис. 4.** Пример дескриптора



**Рис. 5.** Результат работы алгоритма

текстуры. LBP вычисляют локальное представление текстуры. Это локальное представление строится путем сравнения каждого пикселя с окружающей его окрестностью.

Первым шагом в построении дескриптора текстуры LBP является преобразование изображения в оттенки серого. Далее для каждого пикселя в изображении выбирается окрестность размером  $r$ , окружающую центральный пиксель. Затем для этого центрального пикселя вычисляется значение LBP, которое сохраняется в выходном 2D-массиве с той же шириной и высотой, что и входное изображение.

Рассмотрим исходный дескриптор LBP, который работает с фиксированной окрестностью пикселей  $3 \times 3$  следующим образом (*рисунок 3*).

На *рисунке 3* выбирается центральный пиксель и сравнивается с 8 пикселями по соседству. Если интенсивность центрального пикселя больше или равна соседнему пикселю, устанавливается значение 1, в противном случае 0. С 8 окружающими пикселями всего  $2^8 = 256$  возможных комбинаций кодов LBP.

Далее необходимо рассчитать значение LBP для центрального пикселя. Можно начать с любого соседнего пикселя и двигаться по часовой стрелке или против часовой стрелки, но порядок должен быть одинаковым для всех пикселей изображения и всех изображений в рассматриваемом наборе данных. Таким образом, учитывая окрестность  $3 \times 3$ , имеется 8 соседей, на которых необходимо выполнить двоичный тест. Результаты этого бинарного теста хранятся в 8-битном массиве, который затем преобразуется в десятичный вид (*рисунок 4*).

В примере, представленном на *рисунке 4*, за начало обхода принята верхняя правая точка,

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

от которой осуществлен обход по часовой стрелке, с накоплением двоичной строки по мере продвижения. Затем необходимо преобразовать двоичную строку в десятичную.

Последним шагом является вычисление гистограммы по выходному массиву LBP. Поскольку окрестность  $3 \times 3$  имеет  $2^8 = 256$  возможных шаблонов, наш двумерный массив LBP имеет минимальное значение 0 и максимальное значение 255, что позволяет нам построить 256-битную гистограмму кодов LBP в качестве окончательного вектора признаков.

После получения векторов признаков всех необходимых изображений, следует обучить машину опорных векторов для нахождения отличий признаков [4].

Можно заметить, что в случае, представленном на рисунке 5, очевидный случай возгорания не был распознан [5]. При использовании алгоритма локальных бинарных шаблонов дым и пламя, для их успешного распознавания, должны занимать большую часть кадра. В данном случае, для успешного раннего выявления возгораний, необходимо разделять изображение на большое количество обрабатываемых отдельно фрагментов.

### 2. Применение аппарата нейронных сетей

#### 2.1. Модель классификации изображений

Классификация изображений [6] – это задача присвоения метки или класса всему изображению. Модели классификации изображений

принимают в качестве входных данных изображения, выдавая в качестве результата прогноз о принадлежности их к определенному классу.

В качестве недостатка данного подхода следует отметить, что изображения могут быть отнесены только к одному классу, тогда как в реальности, на одном изображении может быть запечатлен и дым, и огонь.

#### 2.2. Модель обнаружения объектов

Обнаружение объектов [7] – это задача обнаружения экземпляров объектов определенного класса на изображении и выделения объектов ограничительной рамкой. К таким классам в рассматриваемой задаче следует отнести дым и огонь.

Для проверки качества работы нейронных сетей с целью обнаружения дыма и огня, как объектов, было обучено несколько различных сетей, основанных на архитектурной модели YOLOv5 с использованием обучающей выборки, взятой из открытого источника [8]. В таблице 1 представлены метрики полученных моделей.

Для определения возгораний самым важным является минимальное количество ложноотрицательных результатов, что учитывает метрика recall. Также была взята метрика F2, которая вычисляется как среднее гармоническое между precision и recall, взвешенное в сторону recall. По метрике F2 лучшей архитектурой оказалась yolov5n-ghost. По метрике mAP@.5 лучшей архитектурой оказалась yolov5n-fpn-ghost.

**Таблица 1**  
Полученные метрики моделей

	Precision	Recall	F2-score	mAP@.5	mAP@.5:95
yolov5n	0.489	0.488	0.488	0.457	0.189
yolov5n-p2	0.474	0.407	0.419	0.382	0.151
yolov5n-p234	0.0848	0.46	0.244	0.105	0.0277
yolov5n-p34	0.482	0.452	0.458	0.409	0.164
yolov5n-p6	0.576	0.464	0.483	0.487	0.208
yolov5n-ghost	0.493	0.51	0.507	0.476	0.204
yolov5n-fpn	0.494	0.474	0.478	0.442	0.178
yolov5n-bifpn	0.529	0.456	0.469	0.46	0.199
yolov5n-fpn-ghost	0.602	0.474	0.495	0.506	0.219
yolov5n-fpn-p6	0.563	0.458	0.476	0.481	0.217
yolov5n-fpn-p6-ghost	0.589	0.439	0.463	0.464	0.203

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Следует отметить, что на обучение подобной модели требуется больше времени, чем на модель классификации изображений. Форма дыма и огня не всегда позволяет отрисовать вокруг них ограничительную рамку без попадания в нее других объектов, что может быть проблемой при обучении.

### 2.3. Семантическая сегментация

Семантическая сегментация [9] – это алгоритм глубокого обучения, который связывает метку или категорию с каждым пикселем изображения. Он используется для распознавания набора пикселей и выделения контуров объектов, разделенных на классы. Семантическая сегментация хорошо подходит для обнаружения возгораний, так как контуры дыма и огня имеют разные формы и их не всегда удается отделить ограничительной рамкой.

Обработка контура объекта требует больше вычислительных ресурсов, чем подход с ограничительной рамкой.

### 2.4. Аугментация изображений перед подачей на вход нейронной сети

В данном алгоритме [10] на изображении выбираются все пиксели, которые движутся и окрашены в серый цвет. Затем к этой матрице применяется медианный фильтр для удаления всех рассеянных неагрегированных пикселей, поскольку они представляют собой шум. Далее полученная матрица подается на вход малоразмерной сверточной нейронной сети для локализации дыма на исходном изображении.

Однако следует учитывать, что при выделении только серых пикселей пропускаются пиксели красных оттенков, поэтому пропускается пламя, как видно на рисунке 6. Для решения

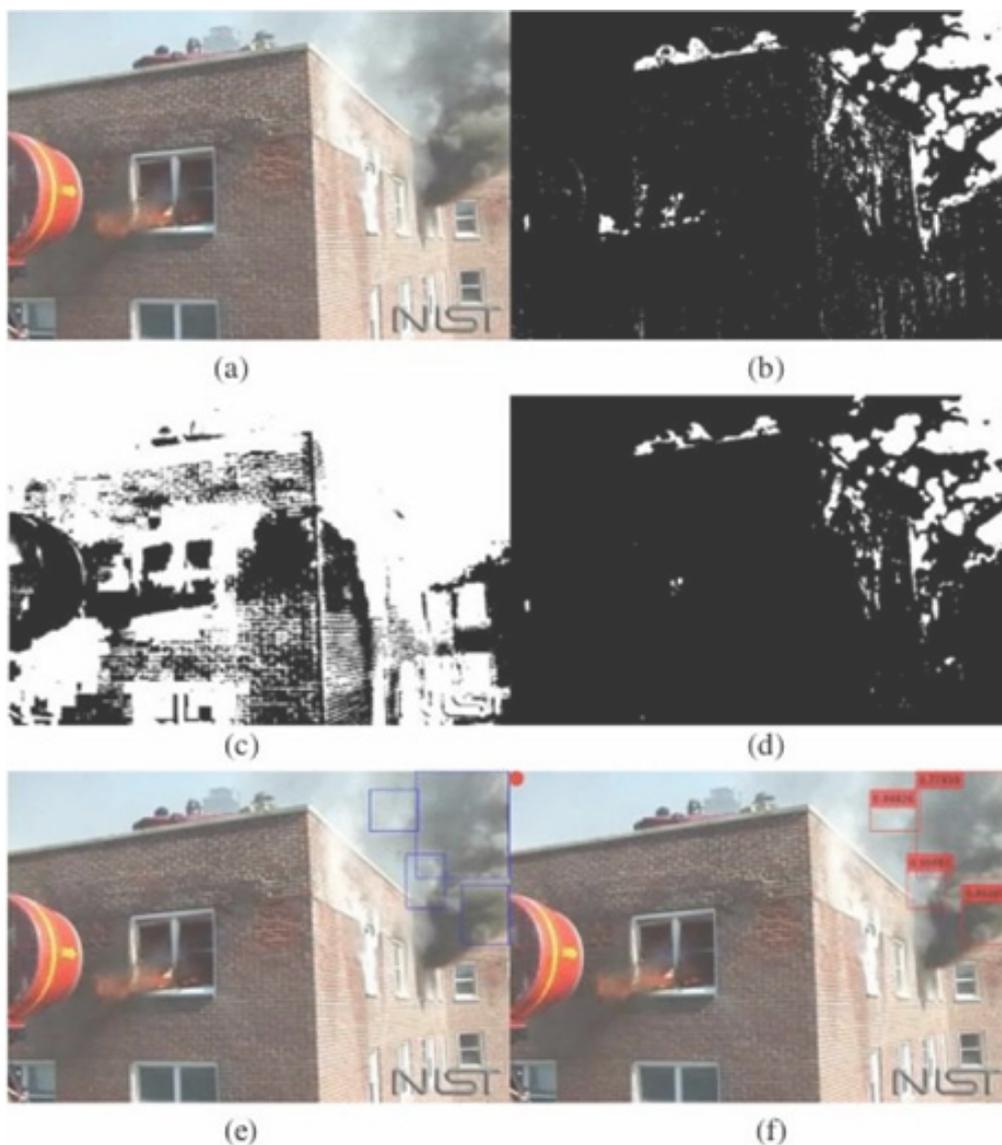


Рис. 6. Пример работы алгоритма

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

этой проблемы понадобится дополнительная обработка изображения и дополнительная нейронная сеть.

### 3. Использование специальных камер

#### 3.1. Алгоритмы AVIOTEC, встроенные в камеры Bosch

В данных устройствах используется сочетание:

- обнаружения движения дыма, как прозрачных и полупрозрачных объектов, меняющих направление и скорость;
- обнаружения пламени по параметрам огня (мерцание пламени, форма пламени, изменение освещенности);
- использования алгоритмов машинного обучения для принятия решения о подаче тревоги в зависимости от предыдущих параметров.

#### 3.2. Использование камер, чувствительных к длинам волн

Использование камер, чувствительных к длинам волн как УФ, так и ИК, для обнаружения дыма и пламени, основано на сравнении пороговых сигналов для обоих диапазонов. Затем границы дыма накладываются на изображение обычной камеры для сегментации.

При этом УФ сенсоры также чувствительны к другим источникам УФ-излучения, такими как молния, сварка и солнечный свет. ИК сенсоры практически не работают во влажных условиях (дождь, туман).

### Заключение

Все рассмотренные методы и системы могут использоваться для обнаружения дыма и/или огня, а также в сочетании с другими пожарными и дымовыми сигнализациями в небольших помещениях, однако, следует учитывать, что:

- на открытых пространствах, таких как лесополосы, автостоянки, стадионы, стройплощадки, автодорожные магистрали лучше всего использовать системы обнаружения объектов и семантической сегментации. Камеры, чувствительные к длинам волн УФ и ИК, могут на этих объектах не корректно работать из-за погодных условий.
- В зданиях с большим внутренним объемом например, на складах, в ангарах, торговых и выставочных центрах, производственных помещениях, тоннелях и любых других сооружениях с высокими потолками и/или активной вентиляцией допустимо использовать специальные камеры, так как нет серьезного влияния погодных факторов.
- Системы анализа видеоизображений в ре-

альном времени необходимо улучшать путем разбиения исходных изображений на равные части. Однако разбиение на большое количество изображений может привести к замедлению работы системы в целом.

### Литература

1. Ронжин Ан.Л., Ватаманюк И.В., Ронжин Ал.Л., Железны М. Математические методы оценки размытости изображения и распознавания лиц в системе автоматической регистрации участников совещаний // Автоматика и телемеханика, 2015. Вып.11. С.132-144.
2. H. Cheng, J. Yin, B. Chen, & Z. Yu (2019). Smoke 100k: A Database for Smoke Detection. In IEEE 8th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE) (pp. 596-597).
3. T. Ojala, M. Pietikainen and T. Maenpaa. «Multi-resolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns» in IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 24, no. 7, pp. 971-987, July 2002, doi: 10.1109/TPAMI.2002.1017623.
4. C.S. Janadri, B.G. Sheeparamatti and V. Kagawade. «Multiclass classification of kirlian images using svm technique», 2017 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), 2017, pp. 2246-2250, doi: 10.1109/ICACCI.2017.8126180.
5. DeepQuestAI/Fire-Smoke-Dataset: <https://github.com/DeepQuestAI/Fire-Smoke-Dataset>.
6. S.J. James and C. Lakshmi «A Comparative Analysis of Multiple Label Image Classification Techniques», 2021 4-th International Conference on Computing and Communications Technologies (ICCT), 2021, pp. 181-188, doi: 10.1109/ICCT53315.2021.9711810.
7. W. Cai, C. Wang H. Huang and T. Wang «A Real-Time Smoke Detection Model Based on YO-LO-SMOKE Algorithm», 2020 Cross Strait Radio Science & Wireless Technology Conference (CSR-SWTC), 2020, pp.1-3, doi: 10.1109/CSR-SWTC50769.2020.9372453.
8. Wu S., Zhang X., Liu R., & Li B. A dataset for fire and smoke object detection. Multimedia Tools and Applications, 2022, Pp.1-20.
9. T. Pham «Semantic Road Segmentation using Deep Learning» 2020 Applying New Technology in Green Buildings (ATiGB), 2021, pp.45-48, doi: 10.1109/ATiGB50996.2021.9423307.
10. Gagliardi A., de Gioia F. & Saponara S. A real-time video smoke detection algorithm based on Kalman filter and CNN. J Real-Time Image Proc 18, pp.2085-2095 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11554-021-01094-y>

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.8.004.9

## О ПРИЗНАКАХ И УРОВНЯХ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА. ЧАСТЬ 1. КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВАНИЯ

## ON THE SIGNS AND LEVELS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE. PART 1. CONCEPTUAL FOUNDATIONS

**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. 1 а  
Тел.: +7 (4967) 35-31-93, доб. 128  
E-mail: iabugakov@iifmail.ru

**Василий Васильевич Елистратов**  
доктор технических наук  
начальник Управления развития технологий  
искусственного интеллекта  
Министерства обороны РФ

**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: tsarkov@iifmail.ru

### Аннотация

В статье изложены концептуальные идеи, касающиеся базисных признаков интеллекта как свойства психики, наличие которых у искусственных объектов позволяет отнести их к объектам с искусственным интеллектом. Введены и описаны различные уровни искусственного интеллекта.

**Ключевые слова:** интеллект, искусственный интеллект (ИИ), психика, распознавание, предвидение, филогенез, онтогенез, геном, генотип, малая эволюция, большая эволюция, познание, модель мира, действие, понимание, сенсорное понимание, глубокое обучение, глубокое понимание, генетический ИИ, обучаемый ИИ, обучающий ИИ, дообучаемый ИИ, символьный ИИ, мультимодальный ИИ, трансферный ИИ, саморазвивающийся ИИ, понимающий ИИ, ИИ человеческого уровня, творческий ИИ, гибридный ИИ, ИИ сверхчеловеческого уровня.

### Summary

The article presents conceptual ideas regarding the basic features of intelligence as properties of the psyche, the presence of which in artificial objects allows them to be classified as objects with artificial intelligence. Various levels of artificial intelligence introduced and described

**Keywords:** intelligence, artificial intelligence (AI), psyche, recognition, foresight, phylogenesis, ontogeny, genome, genotype, small evolution, big evolution, cognition, world model, action, understanding, sensory understanding, deep learning, deep understanding, genetic AI, trainable AI, learning AI, retrainable AI, symbolic AI, multimodal AI, transfer AI, self-developing AI, understanding AI, human level AI, creative AI, hybrid AI, superhuman AI.

Перспективы развития цивилизации во многом определяются возможностями современных технологий, наиболее важными из которых являются технологии, связанные с искусственным интеллектом (ИИ). Важность этих технологий для социально-экономического развития России подтверждается своевременными действиями государственных органов управления: принята Национальная стратегия развития ИИ [1], у-

твержден федеральный проект «Искусственный интеллект» [2], сформированы основные идеи правового регулирования отношений в сфере ИИ [3], разработаны правила предоставления субсидий из федерального бюджета на поддержку проектов в области ИИ [4] и критерии отнесения проектов к этой области [5], осуществляется финансовая поддержка проектов.

В целом, тематика, связанная с ИИ, посте-

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

пенно становится мейнстримом как в научных исследованиях, так и в практических приложениях. Уверенно пришедший на смену постепенно теряющему свою популярность термину «нанотехнологии»<sup>1</sup>, термин «искусственный интеллект» стал новым маяком, свет которого привлекает представителей как науки, так и бизнеса, все чаще заявляющих о наличии в их разработках «искусственного интеллекта» или, более скромно, – «элементов искусственного интеллекта».

Однако общепризнанного в научных кругах понимания того, что такое «искусственный интеллект» и из каких «элементов» он должен состоять, пока нет. Сложность понимания термина «искусственный интеллект», его обоснованного наполнения конкретным содержанием определяется, в первую очередь, отсутствием в настоящее время приемлемого определения понятия «интеллект» («естественный интеллект» – ЕИ). Очевидно, что любое искусственное («искусственная кожа», «искусственная икра» и пр.) должно обладать свойствами естественного, быть способным выполнять те же функции и с тем же (желательно) результатом. Также очевидно, что в естественном можно выделить основные признаки, свойства, наличие которых у искусственного обязательно для того, чтобы оно могло считаться аналогом естественного, способным заменить его в тех или иных случаях применения, выполнить те же функции. Но что такое «интеллект» вообще, какими признаками-свойствами он обладает и какие из них основные, базисные<sup>2</sup>, наличие которых обязательно?

К сожалению, таких базисных свойств, которые бы отражали сущность интеллекта в обобщенном и, главное, в общепризнанном в научном плане виде, повторимся, пока нет. Говоря об интеллекте, используют те или иные понятия из психологии, связывая интеллект с когнитивными функциями в целом, ощущениями, восприятием, сознанием, наличием памяти, пониманием, мышлением, представлением, воображением, планированием, обучением, опытом, принятием решений в условиях неопределенно-

сти, наличием языка и пр. Причем по сложившейся в психологии традиции интеллект приписывается только человеку и именно с позиций человеческого интеллекта ведется речь об ИИ.

Верно ли это? Действительно ли интеллектом обладает только человек? И является ли достаточным основанием для отказа другим живым существам в наличии у них интеллекта<sup>3</sup> факт невозможности для человека ощутить и понять, «каково это быть летучей мышью»?

Думается, что такое обособление ошибочно и непродуктивно. Интеллектом обладают многие живые существа, в частности, все млекопитающие, а также другие представители живой природы, стоящие в иерархической лестнице эволюции ниже млекопитающих. Изучение принципов построения и механизмов функционирования их интеллекта, не отягощенного сложностью интеллекта человека (и потому в отдельных случаях при решении специализированных задач способных показать большую эффективность), представляется важным для их использования при создании эффективных технических систем с ИИ<sup>4</sup>.

Об интеллекте, его обязательных признаках, учет и использование которых были бы полезны как для создания ИИ различного уровня развития, так и для обоснованного принятия решения о принадлежности того или иного проекта к области ИИ, его перспективности, возможностях и рисках – далее в данной статье.

Сущность чего бы то ни было невозможно понять без анализа его предназначения. Сложность анализа интеллекта, прежде всего, в том, что такого органа у человека нет (почки, сердце, печень и др. со своими предназначениями есть, а органа «интеллект» – нет). Интеллект – это понятие, введенное человеком для обозначения качества, свойства психики, которая, в свою очередь, обозначается в психологии тоже как свойство («высокоорганизованной живой материи»<sup>5</sup>), причем и то, и другое – свойства системные, эмерджентные, сверхаддитивные. Не вызывает сомнения, что возникновение психики в целом и интеллекта как ее свойства в мире естествен-

<sup>1</sup> Крайне важная область, открывающая широкие возможности для сборки сложного из простого, большого из малого (чем меньше размер «деталей», тем больше возможностей по созданию из них различного целого).

<sup>2</sup> Идея базиса, обращенная к обобщенному ряду Фурье, является одной из основополагающих идей мироздания, отражающая возможность представления любого сложного в том или ином пространстве в виде суммы одного и того же набора простых элементов, взятых в различных комбинациях с различными весовыми коэффициентами. Главное, чтобы базис был полным [6].

<sup>3</sup> Наблюдение за действиями животных в различных ситуациях убеждает в обратном.

<sup>4</sup> Потому целесообразнее говорить не только об интеллекте вообще, подразумевая под ним интеллект человека, к реализации функций которого следует, конечно, стремиться, но и о частных (видовых) вариантах интеллекта для своей среды «обитания» его носителя, каждый из которых имеет как общие черты «интеллекта», так и свои видовые отличия, весьма полезные для воспроизводства их в технических устройствах.

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ного отбора живых организмов является эффективным решением проблемы выживания усложняющихся форм жизни<sup>6</sup>. Усложнение живых организмов, как правило, ухудшает быстроту их реакции, так что в режиме реального времени более сложное живое неспособно было бы конкурировать с более быстрым простым и было бы обречено на вымирание, если бы не интеллект.

Интеллект позволяет организму предвидеть (достоверно прогнозировать будущее) и на этой основе эффективно решать задачу выживания (в частности, как убегая от хищника, так и преследуя добычу<sup>7</sup>). Именно предвидение – основное предназначение интеллекта [7-11]. А основная операция – распознавание (предвидение – «распознавание будущего»). Глубина предвидения – глубина интеллекта («управлять – значит предвидеть»). Чтобы распознавать и предвидеть, надо иметь соответствующую целям и задачам модель мира, иметь опыт действия в нем с учетом своих и чужих возможностей, а это требует наличия способности ощущать и воспринимать мир (ту его часть, которая важна для выживания)<sup>8</sup>, наличия памяти, способности моделировать ситуации и процессы («размышлять», «представлять», «анализировать»), формировать (при наличии уже сформировавшегося опыта – выбирать) и реализовывать, понимая последствия того или иного действия, приемлемый алгоритм поведения с возможностью его коррекции при поступлении в процессе реализации новых данных. По мере накопления опыта решение встречающейся ранее задачи становится все более качественным с постепенным превращением сформированного алгоритма ее решения в очередную записанную в нервную систему

(психику) программу-автоматизм, далее запускаемую потребностью и внешним стимулом (совокупностью стимулов) [9-11, 13-17].

Говоря об интеллекте как свойстве психики, следует учесть, что он (как и психика в целом) имеет две составляющие: генетическую (филогенетическую) и индивидуальную (онтогенетическую). Первая (филогенетическая) отражает интеллект вида («видовой интеллект») на текущий момент его эволюционного развития в своей среде обитания. Вторая отражает интеллект индивида на текущий момент его жизни в конкретных условиях среды обитания. Причем повторим, что психика в целом и ее «часть» – интеллект призваны обеспечить выживание тела их носителя<sup>9</sup>. Без тела и его действий интеллект, даже будучи генетически предзаданным, не проявится и не разовьется<sup>10</sup>.

В видовой составляющей заложены общая программа и подпрограммы развития, последовательность и моменты времени задействования которых важны для формирования полноценного организма<sup>11</sup>, конкретные неизменные алгоритмы действий (в частности, инстинкты, алгоритмы обеспечения гомеостаза), а также обобщенные подпрограммы-структуры, раскрытие и наполнение которых осуществляется конкретным индивидом в его личной жизни в зависимости от условий существования и возникающих потребностей<sup>12</sup>. Это обобщение касается, в первую очередь, способностей, набор которых у каждого вида свой и каждая из которых дается индивиду априорно (до рождения) через его генотип<sup>13</sup>, причем каждая способность каждого вида имеет свой «амплитудный» диапазон<sup>14</sup>.

И филогенетическая, и онтогенетическая

<sup>5</sup>Со студенческих лет кажущееся естественным определение, пока не задумаешься о критериях «высокоорганизованности». Почему не «высокоразвитой»? Хотя и то, и другое, неся идею «высокости», особо ничего (кроме указания на некий высший уровень) не дает для понимания сущности.

<sup>6</sup>Хотя вопрос о целесообразности введения отдельного понятия «интеллект» для обозначения им «свойства психики», являющейся «свойством высокоорганизованной материи», решающей задачи правильного познания мира и себя в нем для совершения правильных действий, является открытым (принцип неумножения сущностей нельзя забывать). Введение отдельных понятий для обозначения частного в рамках общего иногда приводит к забыванию этого общего, его организующей и направляющей роли в функционировании частного, что частично и происходит сегодня (забывание того, что интеллект без психики быть не может, а психики не может быть без тела и все это – для выживания носителя психики и интеллекта посредством ощущения внешнего мира, восприятия его объектов и процессов, совершения действий в пространстве-времени реальности).

<sup>7</sup>Так, хищник бежит за зайцем не в ту точку, где заяц находится в данный момент времени, а туда, где он предполагает встретиться с ним через некоторое время с учетом своей скорости, скорости и направления движения зайца, причем петляние зайца непрерывно корректирует место встречи.

<sup>8</sup>Относя воспринимаемое к той или иной категории [12,13].

<sup>9</sup>Ибо со смертью тела исчезает и обслуживающая его психика, и ее главный «инструмент» – интеллект.

<sup>10</sup>Выращенные «мозги в пробирке» свойствами интеллекта обладать не могут. Голова профессора Доуэля демонстрировала наличие интеллекта, поскольку долгое время была частью функционирующего в реальном мире тела и сохранила в себе развитую модель этого мира с пониманием причин и следствий действий в нем.

<sup>11</sup>«Дети-маугли», пропустившие период реализации генетически заданной программы первичной социализации среди людей, будучи возвращенными в социум, неспособны стать полноценными людьми.

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

составляющие непрерывно (в своем масштабе времени) пополняются посредством обучения. В филогенезе «учится» вид<sup>15</sup>, в онтогенезе – индивид. Результатом обучения является расширение модели мира, пополнение опыта (experience): как в процессе развития, эволюции вида (species evolution) – «большой эволюции» («great evolution», «experience of great evolution»), так и в процессе развития, эволюции индивида (evolution of the individual) – «малой эволюции» («small evolution», «little evolution experience»)<sup>16</sup>. Усложнение вида в процессе «большой эволюции» повышает роль «малой эволюции». Именно в процессе наполнения генетически предзаданной (под свою среду обитания) пространственно-временной индивидуальной модели мира знаниями о «реальности» формируется и развивается интеллект<sup>17</sup>.

Интеллект наполняется через действия в реальном мире, через распознавания ощущений и их совокупностей, формирующих восприятия. Но любое восприятие невозможно без той или иной модели мира воспринимающего, в которой уже органично присутствует воспринимаемое как известное или в которую органично встраивается воспринимаемое как новое. Заметим, что для того, чтобы только что родившееся живое существо способно было начать воспринимать,

необходимо наличие априорно заданного обобщенного опыта вида, позволяющего родившемуся посредством «самоорганизации»<sup>18</sup> психики правильно воспринимать реальность. Т.е. психика и интеллект, повторим, имеют генетически предзаданную основу. Вспомним слова Конрада Лоренца о том, что не только копыто лошади или плавник рыбы уже до рождения приспособлены к будущей среде своего обитания, но и структуры нервной системы, позволяющие использовать копыто и плавник по своему назначению [19]. Добавим – оптимально приспособлены. Причем эта приспособленность касается и способности генома живого противостоять различным вирусным «атакам»<sup>19</sup>.

Такое встраивание в онтогенезе невозможно без понимания. Понимание – основное условие правильного распознавания объектов и процессов в пространстве-времени, условие предотвращения совершения грубых ошибок. Причем отметим, что наличие сознания для многих случаев понимания (в частности, для понимания ранее воспринимаемого, занявшего свое место в модели мира воспринимающего) не является обязательным [11].

Обладает ли восприятием современная искусственная нейронная сеть, например, выявляющая на фотоснимках автомобили? Условно

<sup>12</sup>Очень экономный и правильный путь, частично вынужденный из-за ограниченности размера мозга носителей ЕИ (ограниченность родовых путей) и скорости передачи сигналов в нервной системе.

<sup>13</sup>К таким априорным, генетически заданным способностям человека можно отнести, в частности, способность к языковому общению, так что роль социума сводится к наполнению генетически заданных обобщенных алгоритмов-структур, что отстаивал Н. Хомский [18].

<sup>14</sup>Например, человек, кому от рождения музыкальные способности даны в области правого края диапазона музыкальных способностей человека (ближе к максимальному значению), вполне может стать великим музыкантом. Если же музыкальные способности человеку даны от рождения соответствующими левому краю диапазона (ближе к минимальному значению), то такой человек при большом упорстве может стать музыкантом, но вряд ли великим. Потому так важна ранняя диагностика способностей ребенка, чтобы направить его жизненный путь в том направлении, в котором его щедро одарила природа.

<sup>15</sup>Один из основных вопросов эволюционного пополнения генома может быть сформулирован так: «После скольких эволюционных итераций (поколений) приобретаемое каждым индивидом в процессе его жизни одно и то же полезное свойство записывается в генетическую программу вида (геном) как общее полезное для будущих поколений свойство? И как это происходит?» [13].

<sup>16</sup>Обращаясь к значению слова «эволюция» (лат. evolutio – развёртывание) и не забывая, что «тому, что существует, уже наречено имя», неизбежно приходишь к очевидному «детскому» вопрошающему рассуждению: «Ведь для того, чтобы что-то развернуть, это что-то в том или ином виде сначала надо так или иначе свернуть!? Как это происходит? Как формировались геномы видов, где и как записан алгоритм их «развертывания»? И есть ли геном жизни в целом, генотип природы планеты Земля,...?».

<sup>17</sup>Что такое «реальность на самом деле» мы не знаем (и вряд ли когда узнаем), ибо у каждого вида и индивида «реальность» своя – та, которую ему в виде модели формирует его нервная система. Так что «объективная реальность» без субъекта, конечно существует, но ее сложно наполнить чем-либо. Более того, как утверждает квантовая физика, субъект не только наблюдает свою «реальность», но и актом наблюдения формирует ее, вызывая коллапс всевозможного в единственно «реальное».

<sup>18</sup>Широко используемый, но весьма спорный термин, ибо в причинно-следственной иерархически-сетевой модели мира «самости» (даже в рамках «спонтанного нарушения симметрии» в квантовой физике) вряд ли можно найти место, поскольку изолированных систем нет (все системы открыты) и происходящие внутренние процессы, рождающие импульс «самоорганизации», не могут не испытывать внешнего влияния того, что известно науке, хотя бы как факты (в частности, всепроникающей гравитации или электромагнитных полей).

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

можно считать, что воспринимает. Сеть обрабатывает сенсорный сигнал в виде паттерна (набора пикселей), получая его цифровой образ, и сравнивает его с имеющейся у нее «моделью мира», состоящей из двух категорий: «автомобили» и «все остальное». Но понимает ли она? Очевидно, что не только человеческого понимания (что такое автомобиль, где он применяется, какими свойствами обладает и пр.), но и даже понимания, например, кошки (большое, движется, опасно,...) у нее нет. А что есть? Есть то, что условно можно назвать «статистическим пониманием», соответствием входа-выходу, что весьма оптимистично отождествляется Р. Курцвейлом с настоящим пониманием [20]<sup>20</sup>. Отсюда и известные недостатки ИИ с таким «пониманием»<sup>21</sup>.

Важнейшей составляющей правильного понимания живых организмов является наличие «здорового смысла» (своего у каждого вида) в рамках их модели мира как системы общих знаний об объектах и процессах воспринимаемой реальности с их причинно-следственными и ассоциативными связями. Здравый смысл создает правильный контекст восприятия-понимания, позволяющий избежать грубых ошибок современных реализаций ИИ.

С учетом вышеизложенного, более подробно рассмотрим отдельные обязательные признаки интеллекта и их системные совокупности, определяющие уровни развития ИИ.

Прежде всего, следует отметить обязательность наличия модели мира с алгоритмами поведения в нем, достаточных для выживания организма с ЕИ или выполнения своей функции объектом с ИИ. Эта модель в общем случае представляет собой совокупность филогенетической и онтогенетической составляющих, отражающих опыт вида и индивида<sup>22</sup>. В живых организмах филогенетической составляющей, несущей результаты эволюции вида, принадлежит особая роль, поскольку она во многом определяет возможности дальнейшего онтогенеза, в котором проявляется заложенная в геноме общая

для вида программа жизни с последовательным раскрытием (задействованием) в свое время и в своем месте (при наличии требуемых условий) специализированных подпрограмм развития и поведения организма. Именно эта составляющая определяет в живом потенциальные возможности организма и важные нормы его поведения, включая возможности иммунитета, наличие генетически заданных «табу»<sup>23</sup>, способность к обучению, творчеству и др. Наличие онтогенеза в природе объясняется множественностью и диапазоном задаваемых свойств (способностей) особи и условий среды, что требует их индивидуальной «подгонки» друг к другу, «необходимостью» эволюционного развития вида посредством мутационных изменений. Очевидно, что и в искусственном «генетическая» составляющая, закладываемая конструктором (разработчиком), является также крайне важной и должна учитывать особенности решаемой задачи, условия ее выполнения, ресурсы и ограничения<sup>24</sup>. Но в отличие от живого, клонирование искусственного ИИ допустимо и может быть эффективным (в том числе – во имя безопасности), особенно для решения конкретных задач в конкретных условиях.

Следовательно, эффективное поведение может быть полностью генетически предзаданным, т.е. полностью филогенетическим без онтогенетической составляющей? Да, может. Таким является поведение простых организмов, связанное с использованием градиентов и производных во внешней среде при поиске пищи и избегании опасностей. Таким же является и «поведение» обрабатывающего деталь станка с числовым программным управлением. Но можно ли считать генетически предзаданное поведение интеллектуальным? В приведенных примерах, на первый взгляд, интеллекта нет. Есть генетически заданные и притом достаточно простые алгоритмы. А если взять «поведение», например, ракет известного комплекса П-700 «Гранит» с комбинированной системой наведе-

<sup>19</sup>Может ли сегодня та или иная компьютерная программа, реализующая ИИ, сравниться с этой способностью генома, хранящегося в каждой клетке организма? Какая «генетика» для противодействия вирусам заложена в эту компьютерную программу ее человеком-разработчиком («творцом»)? И есть ли она?

<sup>20</sup>Противоположное мнение – о невозможности вычислительной реализации понимания – у Р. Пенроуза [21].

<sup>21</sup>Необходимость иметь для обучения ИИ репрезентативную выборку большого объема, грубые ошибки (в том числе и из-за «чрезмерной интерпретации» и плохой обработки пограничных случаев), легкость целенаправленного обмана ИИ (в частности, посредством «отравления» данных для первичного обучения), непредсказуемость путей достижения и несоответствие результата поставленной цели как следствие отсутствия у ИИ «здорового смысла», непрозрачность (и, как следствие, недоверие к решениям ИИ, опасность использования ИИ в ответственных случаях), катастрофическая забывчивость, сложность контроля развития самообучающегося ИИ и др. [9-11].

<sup>22</sup>В ИИ опыт «вида» могут нести «жесткие» логические интегральные схемы (ЛИС), а индивида – «гибкие» программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС). Интеллект=ЛИС+ПЛИС [11].

<sup>23</sup>Например, на межвидовое скрещивание животных, на инцест для человека.

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ния, способных действовать в «стае», перераспределять цели, заменять выбывшего «вожака» и др. (см., например, [22])? Не зря же эти ракеты называют «умными». Или зря, поскольку ничего, кроме априорно заложенного алгоритма поведения («если..., то...»), пусть сложного, разветвленного, но определенного заранее, эти ракеты также не демонстрируют?! Так где здесь интеллект? И чей он, если есть? Очевидно, что эти ракеты демонстрируют интеллект их разработчика, конструктора, хотя для не знающего об этом наблюдателя со стороны их «поведение» является вполне «интеллектуальным». Тогда можно считать, что эти ракеты успешно «имитируют» «когнитивные функции человека» (ведь они же самостоятельно распознают ситуации, принимают правильные решения и реализуют их) и на этой основе признать наличие у них ИИ? Или эта имитация должна быть связанной не только с реализацией правильного достаточно сложного алгоритма, но и (и это может быть главным!) с его получением посредством применения своих (!) когнитивных (познавательных) способностей? Ведь ничего познавательно нового в процессе полета такой ракеты (как и при работе станка с числовым программным управлением) не происходит (истинно познавательные функции связаны с расширением модели мира, а здесь модель мира неизменна и задается априорно). И говорить о наличии интеллекта у объекта можно лишь тогда, когда объект сам создает правильный алгоритм поведения, не записанный ранее в его память? Так что разветвленные алгоритмы с конкретными отработанными правилами «если..., то...» не имеют отношения к интеллекту? Т.е. интеллект, исходя из этого, должен быть связан не только с результатом, но и с процессом его получения<sup>25</sup>?

Обратимся к творческим способностям человека. Сегодня вряд ли кто сомневается в их генетической предзаданности, в том, что в основе так называемого инсайта («внезапного озарения») лежат бессознательные, но приводящие к желаемому результату (и потому пусть сложные, но алгоритмически заданные!) процессы<sup>26</sup>.

Потому, если нам нужен результат, можно говорить об успешности рассмотренной выше имитации и присутствии интеллекта у технических систем, наблюдение за которыми со стороны убеждает в их «интеллектуальности». И та-

кие разработки весьма эффективны при применении их в условиях полноты и конкретности исходных и текущих данных, поскольку у них нет недостатков наиболее распространенных сегодня систем с ИИ на основе машинного обучения. Да, основной задачей любого интеллекта является нахождение решения в новых условиях и формирование на этой основе новых алгоритмов<sup>27</sup>, так что развитие интеллекта сопровождается расширением хранимой им модели мира с все большим присутствием в ней алгоритмической составляющей. Но если выдающийся человек-конструктор посредством своего естественного интеллекта нашел оптимальное решение сложной и важной интеллектуальной задачи и заложил его в «генетику» разработанной им конструкции в виде гарантированно эффективных алгоритмов, учитывающих различные факторы с их различным ситуативным влиянием, став таким образом «творцом», то, конечно, следует приветствовать такое «творение» и признать наличие у таких конструкций ИИ. Причем для того, чтобы отличать такой ИИ от других вариантов, можно назвать такой ИИ *генетическим ИИ (ГГИИ или GTAI<sup>28</sup> – genetic artificial intelligence)*, иначе – *программно-заданным ИИ (ПЗИИ или SDAI – software-defined artificial intelligence)*, выделяя различные реализации этого варианта по степени сложности, например, от ГГИИ первого уровня (с «возможностями» станка с числовым программным управлением) до ГГИИ  $n$ -го (?) уровня (с возможностями сложного адаптивного поведения в условиях неопределенности).

К ГГИИ (ПЗИИ) следует отнести и незаслуженно забытый ныне *символьный ИИ (СИИ или SAI – symbolic artificial intelligence)*, ограниченного количества правил которого для многих случаев применение вполне достаточно для обеспечения эффективного «поведения» технических систем, несмотря на наличие общей проблемы «проклятия размерностей». Для реализации того или иного правила необходимо выполнить «интеллектуальные», по сути, операции: зафиксировать совокупность сенсорных сигналов, распознать полученный интегральный сенсорный паттерн, сравнив его с имеющимися в памяти с учетом допусков и заданных вероятностей, и, в зависимости от полученного результата, принять и реализовать то или иное решение. Такое

<sup>24</sup>Применительно к ИИ на основе машинного обучения речь может идти, например, о структуре, используемой искусственной нейронной сети, предзаданности отдельных весовых коэффициентов.

<sup>25</sup>Но известные тесты (Тьюринга или «кофейный тест» Возняка) нацелены на результат, а не на процесс! (?)

<sup>26</sup>Не случайно интеллект часто называют «сверхалгоритмом по порождению алгоритмов».

<sup>27</sup>Как поведенческих, так и мыслительных, когнитивных.

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

«понимание» можно назвать *сенсорным пониманием* (*sensory understanding*), пониманием на уровне сенсорных сигналов. Оно всегда присутствует в живых организмах как первый, низший уровень понимания. Таких уровней в живом столько, сколько уровней в их иерархически-сетевой модели мира (у человека высшие уровни связаны с абстрактными категориями и понятиями).

Повторим, что достоинством ГТИИ является «прозрачность» (понимание человеком) его «поведения», а также исключение совершения им грубых ошибок (опять-таки на основе заложенных правил достижения цели и правил-«табу»), что немаловажно, а в критических случаях является определяющим. Отличием «сложных» систем ГТИИ от «простых» является наличие адаптивности, проявляющейся в том, что очередной шаг (действие) алгоритма поведения не является единственным, а выбирается из возможных известных шагов, исходя из полученной к моменту совершения этого шага информации.

ГТИИ целесообразно рассматривать как основу следующего уровня развития ИИ, в котором очередным «шагом» того или иного сложного алгоритма может быть нахождение чего-либо неизвестного, для которого пока нет своего частного алгоритма, но есть набор эвристик и правил их использования с учетом цели. Применяя эти правила и эвристики (по сути, реализуя загадочный «инсайт»), можно найти этот алгоритм, расширив тем самым свой опыт. Этот шаг можно «подсмотреть» у соседа, используя весьма развитую в природе идею подражания. Этому шагу может научить учитель<sup>29</sup>. Т.е. речь идет о *способности обучаться*, которая является важнейшим отличительным качеством-признаком ЕИ, обеспечивающим его развитие в процессе онтогенеза, расширение его модели мира и пополнение опыта поведения в нем. Именно посредством обучения (машинного) современные технические системы приобретают свою «интеллектуальность», демонстрируя *способный обучаться ИИ* (СОИИ или LAI - *learningable artificial intelligence*), иначе – *обучаемый ИИ* (ОБИИ или TAI – *trainable artificial intelligence*). К сожалению, у со-

временных реализаций СОИИ на основе искусственных нейронных сетей (ИНС) глубокого обучения, использующих статистическое соответствие входа и выхода, практически нет ни общей (обязательной для любого ЕИ), ни видовой генетики, что существенно повышает требования к условиям их обучения и практического применения<sup>30</sup>. Отметим, что обучение символического ИИ в общем случае связано с порождением новых правил.

Обязательность наличия «учителя» позволяет в качестве варианта ИИ рассматривать *обучающийся ИИ* (ОБИИ<sup>31</sup> или LAI – *learning artificial intelligence*), предназначенный для обучения других ИИ, не имеющих своего онтогенетического опыта. Одной из способностей ОБИИ можно считать способность порождать новые данные, которую демонстрирует ИИ, получивший название *генеративного* (*generative artificial intelligence – GAI*). В более простом случае – размечать имеющиеся данные. Заметим, что ОБИИ может обучать не только ИИ, но и, очевидно, ЕИ (в частности, человека).

Дальнейшее развитие ИИ можно связать со способностью пополнять полученный на этапе обучения опыт в процессе применения ИИ по своему назначению. Это свойство является очевидным и присуще всем организмам с ЕИ, но пока сложно достижимым для известных вариантов ИИ (новые данные можно использовать, но, как правило, только посредством пополнения ими обучающей выборки и повтором всего процесса обучения ИИ). Такой *дообучаемый ИИ* (ДИИ или RTAI – *retrainable artificial intelligence*), совершенствующий свой опыт в процессе функционирования, весьма перспективен.

Целесообразно выделить также *мультимодальный ИИ* (МИИ или MMAI – *multimodal artificial intelligence*), получающий из внешнего мира информацию по различным сенсорным каналам с последующей их совместной обработкой, что способно существенно повысить эффективность распознавания и предвидения.

Важной способностью ИИ является способность *переносить полученный* в одной области

<sup>28</sup>Аббревиатура GAI уже закреплена за генеративным ИИ (см. далее), «отобравшим» ее от более достойного претендента – общего ИИ (general AI), ныне обозначаемого как AGI (artificial general intelligence – искусственный общий интеллект).

<sup>29</sup>Наличие «учителя» – обязательное условие любого обучения. Известные вариации обучения ИНС: с учителем, без учителя, с подкреплением, самообучение и др. – на самом деле всегда есть «обучение с учителем» – одним или несколькими, обязательным из которых при всех видах обучения является собственная психика, управляющая обучением через генетически заложенные потребности, желания, ощущения.

<sup>30</sup>Полезная идея функционализма («функция может быть реализована различными способами») в ИНС пока чаще всего реализуется «силовым» способом – за счет «размера» (данных, сети, вычислительной мощности).

<sup>31</sup>Аббревиатура ОИИ уже используется в русскоязычной литературе для обозначения «общего» ИИ. Заметим, что в научном плане целесообразность использования в настоящее время деления ИИ на «сильный», «слабый», «общий», «специализированный», «универсальный» – под большим вопросом [10].

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

*опыт* на другую область. Такой *трансферный ИИ* (ТИИ или *TEAI – artificial intelligence with experience transfer*) возможен при наличии связывающей эти области модели мира. Его можно достичь как с помощью правил, позволяющих сравнивать и находить необходимое соответствие между областями, так и с помощью более общего, и во многом более сложного, но и более универсального подхода, позволяющего приблизиться к *настоящему ИИ*, – подхода на основе *понимания*, связанного с задействованием при восприятии смыслов и значений используемой модели мира, связей (отношений) учитываемых в ней объектов и процессов, языка для их описания.

ИИ, способный самостоятельно обучаться (на основе только генетики или в сочетании генетики с полученным начальным опытом обучения с внешним учителем), приобретая, закрепляя и расширяя свой личный опыт, – *саморазвивающийся ИИ* (СИИ или *SDAI – self-developing artificial intelligence*). Очевидно, что саморазвивающийся ИИ является одновременно и дообучаемым. Область, связанная с саморазвитием ИИ, требует весьма осторожного с ней обращения, обязательного априорного заложения в защищенный, трудно корректируемый «геном», правильных векторов целей и ограничений.

Саморазвивающийся ИИ, способный «настоящему» понимать, – *понимающий ИИ* (ПИИ или *UAI – understanding artificial intelligence*), иначе – *настоящий ИИ* (НИИ или *RAI – real artificial intelligence*). Путь «от глубокого обучения к глубокому пониманию» («*from deep learning to deep understanding*»), системно (сверхаддитивно) объединяющий статистическо-вероятностные возможности современного глубокого обучения с глубоким пониманием на основе семантики символического контекстного (с опорой на «здравый смысл») подхода (*deep learning + deep understanding*) – основной путь создания настоящего, способного к правильному обобщению (вспомним, что «обобщение – сущность познания»<sup>32</sup>, саморазвитию ИИ [9, 10]. Этот путь несет человечеству как великие блага, так и значительные риски, особенно если такой саморазвивающийся ИИ будет способен совершать значимые действия не только внутри своей модели мира (в виртуальном мире), но и на основе такого моделирова-

ния – в реальном мире<sup>33</sup> [16]. Применительно к глубокому обучению ИНС глубокое понимание означает понимание в каждом слое с обращением к соответствующему иерархическому уровню используемой ИНС модели мира, что, с учетом контекста («здравого смысла»), сигналов с верхних и параллельных уровней позволяет быстрее и точнее распознать воспринимаемое и принять «разумное», правильное решение.

Понимание воспринимаемого «настоящим» ИИ в рамках своей модели мира должно быть «правильным», т.е. не должно противоречить пониманию того же воспринимаемого «настоящим» ИИ с более развитой моделью мира, вплоть до ИИ с наиболее полной моделью мира и способностями, соответствующими уровню человека (*ИИ человеческого уровня – ЧУИИ* или *HLAI – human level artificial intelligence*)<sup>34</sup>. Понимающий ИИ уровня человека способен демонстрировать различные виды настоящего (признаваемого человеком) *творчества* (технического, научного, художественного,...). Речь идет о *способном к творчеству ИИ, творческом ИИ* (СТИИ, ТИИ или *CAI – creative artificial intelligence*)<sup>35</sup>.

Очевидно, что возможны различные сочетания выделенных признаков и уровней ИИ, порождающие тот или иной вариант *гибридного ИИ* (ГИИ или *AIG – artificial intelligence hybrid*). В настоящее время о гибридном интеллекте говорят, имея в виду объединение возможностей ИИ и ЕИ человека. Это, конечно, гибридность, но не единственная. Для многих задач может быть целесообразным объединение (в пространстве и (или) во времени) ИИ различных «видов», в частном случае – специализаций, исходя из качества решения тех или иных задач. Универсальность ИИ, о которой сегодня много говорят и к которой справедливо стремятся в плане объединения частных способностей ИИ с приближением его возможностей к возможностям ЕИ человека (универсальный ИИ, общий ИИ), весьма важна, но для практики более важно качество решения конкретной задачи или ограниченной совокупности конкретных задач<sup>36</sup>. Такая избирательная гибридность функций, использующая «гибридную» модель мира (с сверхаддитивными возможностями упомянутого выше объединения символического ИИ и машинного обучения) с

<sup>32</sup> Речь идет об интегральном, применяемом к модели мира семантическом обобщении, одной из составляющих которого является «статистическое обобщение», демонстрируемое сегодня ИИ на основе ИНС.

<sup>33</sup>Риск переноса результатов из виртуального в реальный мир вытекает, прежде всего, из сложности обеспечения требуемой адекватности используемых виртуальных моделей описываемой ими реальности, формализации и учета всех «очевидных» и «скрытых» составляющих «здравого смысла».

<sup>34</sup>Признать такое соответствие, даже если бы были обоснованные попытки его установить, сегодня невозможно, т.к. в психометрии, несмотря на ее претензию-мем («интеллект – это то, что измеряется тестами интеллекта»), пока нет достаточных мер для измерения ЕИ, а тем более ИИ.

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

опорой на соответствующий этой гибридности «здоровый смысл», правильно связывающий эту модель с «реальностью», – наиболее перспективный путь развития ИИ. Этот путь – путь к созданию *ИИ сверхчеловеческого уровня (СЧУИИ или SHAI – superhuman artificial intelligence)*, способного на самовоспроизводство и эволюционное «видовое» развитие, на создание в качестве творца «братьев своих меньших» (по «своему образу и подобию»), отдельных уникальных конструкций с ИИ. Очевидно, что такой СЧУИИ должен иметь «сознание» (даже «сверхсознание»?)<sup>37</sup>. Возможно ли это? И что это несет для человечества? Ответов, конечно, нет. Главное, чтобы для современной цивилизации появление такого ИИ не стало бы наиболее значимым в его развитии «черным лебедем» с неприемлемыми последствиями.

(окончание следует)

### Литература

1. Национальная стратегия развития искусственного интеллекта на период до 2030 года (утверждена Указом Президента РФ от 10 октября 2019 года №490 «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации»).
2. Концепция развития регулирования отношений в сфере технологий искусственного интеллекта и робототехники до 2024 года (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 19 августа 2020 года №2129-р).
3. Федеральный проект «Искусственный интеллект» национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» (утвержден Президиумом Правительственной комиссии по цифровому развитию 27 августа 2020 года).
4. Постановление Правительства РФ от 21 мая 2021 года №767 «Об утверждении Правил предоставления субсидии из федерального бюджета на поддержку некоммерческой организацией
- Фонд развития Центра разработки и коммерциализации новых технологий пилотных проектов апробации технологий искусственного интеллекта в приоритетных отраслях».
5. Критерии определения принадлежности проектов к проектам в сфере искусственного интеллекта (приказ Минэкономразвития России от 29 июня 2021 года №392).
6. Бугаков И.А. Обобщенный ряд Фурье как универсальный образ действия // Сборник трудов XXV Межрегиональной научно-технической конференции «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем». Ч.2. Серпухов, 2006. С.261-267.
7. Анохин П.К. Опережающее отражение действительности // Вопросы философии, 1962. № 7.
8. Хокинс Д., Блексли С. Об интеллекте: Пер. с англ. М.: ООО «И.д. Вильямс», 2007. 240 с.
9. Бугаков И.А. От глубокого обучения к глубокому пониманию (From Deep Learning to Deep understanding) // Известия Института инженерной физики, 2020. №3(57). С.95-102.
10. Бугаков И.А., Царьков А.Н. Настоящий искусственный интеллект: методологические основания. Серпухов: МОУ «ИИФ», 2020. 418 с.
11. Бугаков И.А. Настоящий искусственный интеллект в военном деле: Deep Learning + Deep Understanding // Известия Института инженерной физики, 2022. №3(65). С.102-107.
12. Брунер Дж. Психология познания. За пределами непосредственной информации. Пер с англ. М.: Прогресс, 1977. 413 с.
13. Бугаков И.А. Принцип минимальности и категоризация в естественном и искусственном интеллекте // Экстремальная робототехника и конверсионные тенденции. Труды Международной научно-технической конференции. СПб: 2018. С.380-385.
14. Бугаков И.А., Царьков А.Н. О когнитивном моделировании, искусственном интеллекте и

<sup>35</sup> В настоящее время делаются первые попытки приобщить ИИ к «творчеству»: в науке – за счет вычислительной мощности, позволяющей методом перебора, проб и ошибок находить желаемое решение (например, химическую формулу), в искусстве, где не особо нужна точность, путем объединения известных и (или) частично видоизмененных кусков материала (например, изобразительного или музыкального), что вызывает порой восхищение «специалистов», заставляя задуматься «неспециалистов» о том, что же такое современное «искусство» и куда оно идет. Конечно, в таком «творчестве» ИИ речь о каком-либо замысле и понимании не идет.

<sup>36</sup> Современный «навороченный» смартфон – вещь, конечно, полезная, но чем больше в нем функций, тем, очевидно, хуже потенциально достигаемое качество реализации каждой из них, учитывая ограничения по габаритам, массе, энергопотреблению, вычислительной мощности, надежности и пр. Правильное упрощение сложного всегда дает выигрыш по эффективности для желаемого частного (например, самолет – упрощение крыльев птицы, колесо – упрощение ног человека как двух спиц переменной длины).

<sup>37</sup> Но что это? Ведь как реализуется сознание человека, наука не знает. Возможно, такое знание впереди. Лишь бы попытки науки понять возникновение и работу сознания человека не были бы аналогичны попыткам инопланетян из известного примера, пытающимся понять работу земного телевизора, анализируя проходящие по микросхемам сигналы, но не учитывающим, что изображение рождается не внутри, а приходит извне, через антенну? Ибо тогда надо будет учитывать «душу», научные знания о которой вряд ли когда появятся.

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

психике роботов // Известия Института инженерной физики, 2018. №2(48). С.100-105.

15. Бугаков И.А. Сознание, интеллект, нейрофилософия и принцип минимальности. // Актуальные вопросы нейрофилософии – 2015. Ежегодник. Материалы международного междисциплинарного семинара «Нейрофилософия». Ред. Алексеев А.Ю., Дубровский Д.И., Кузнецов В.Г. М.: ИИнтелл, 2016. 284 с. С.106-130.

16. Бугаков И.А., Царьков А.Н. Искусственный интеллект в военной робототехнике: возможности, риски, пути реализации // Перспективные системы и задачи управления: материалы Двенадцатой Всероссийской научно-практической конференции и Восьмой молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах». Ростов-на-Дону: Издво Южного федерального университета, 2017. 580 с. С.250-260.

17. Бугаков И.А. Принцип минимальности и деятельность мозга // Сб. научных трудов юбилейного симпозиума, посвященного 150-летию издания статьи И.М. Сеченова «Рефлексы головного мозга». М.: ИИнтелл, 2014. 432 с. С.291-316.

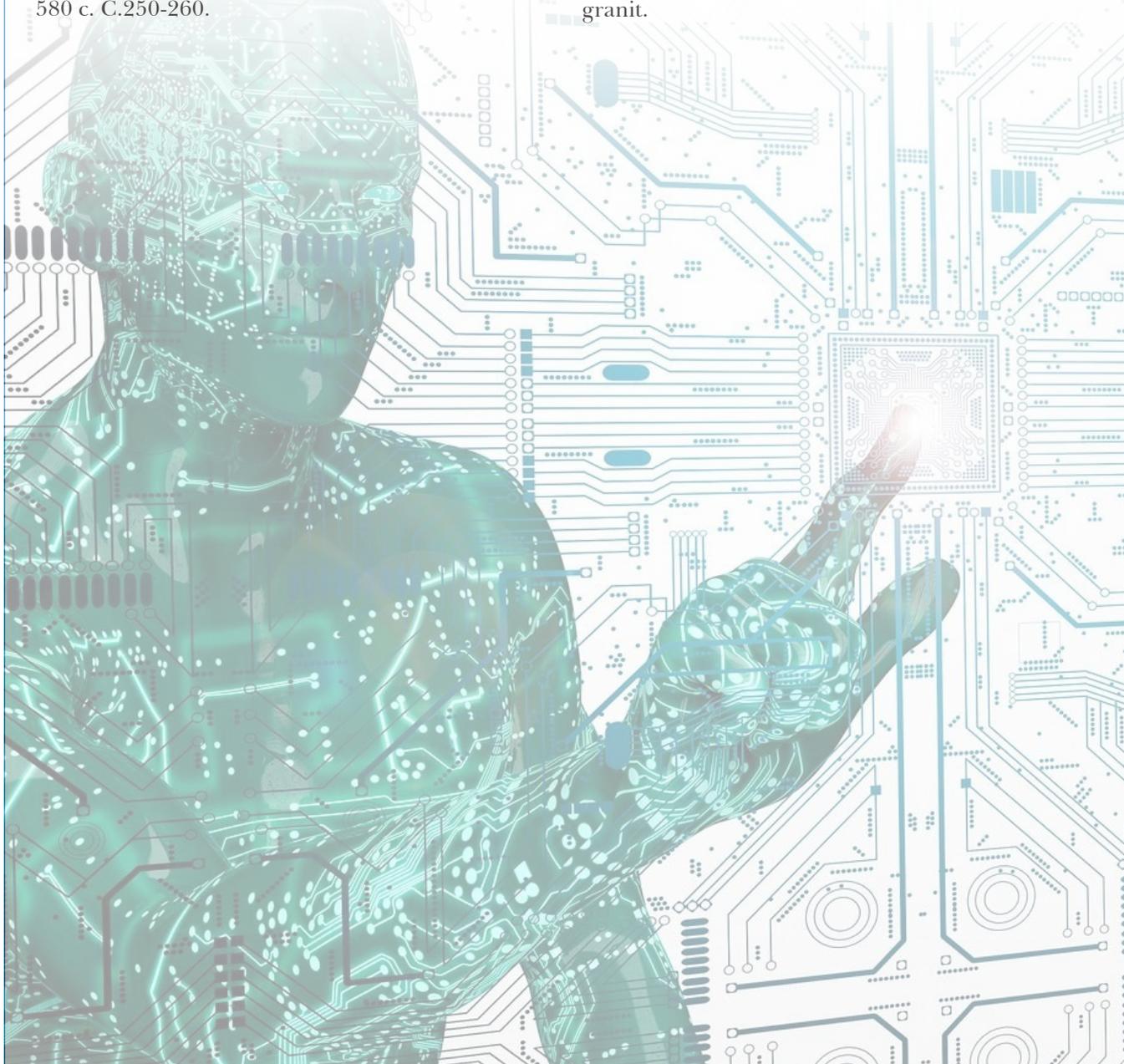
18. Хомский Н. О природе и языке: Пер. с англ. М.: КомКнига, 2005. 288с.

19. Лоренц К. Обратная сторона зеркала (сборник трудов) // А.И. Фет. Собрание переводов. Философский архив, Швеция, 2016. 633 с.

20. Курцвейл Р. Эволюция разума. Пер. с англ. М.: Издательство «Э», 2015. 352 с.

21. Пенроуз Р. Новый ум короля: О компьютерах, мышлении и законах физики: Пер. с англ. М.: Едиториал, 2003. 384 с.

22. Противокорабельная ракета П-700 «Гранит», подробный обзор / <https://army-today.ru/tehnika/granit>.



УДК 004.8

## ОБЗОР НАПРАВЛЕНИЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ НА ОСНОВЕ СОЗДАНИЯ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ

## OVERVIEW OF THE DIRECTIONS OF INTELLECTUALIZATION OF ELECTRONIC EDUCATIONAL RESOURCES BASED ON THE CREATION OF ADAPTIVE ALGORITHMS

**Юрий Фёдорович Михайлов**  
кандидат педагогических наук, доцент  
доцент кафедры информационных  
технологий  
филиал ВА РВСН им. Петра Великого  
(г. Серпухов)  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17  
Тел.: +7 (903) 253-83-94  
E-mail: mikhayurij@yandex.ru

**Анатолий Владимирович Назаренко**  
почетный работник сферы образования РФ  
доцент  
директор Учебного центра «Интеграция»  
филиала «Стрела» МАИ  
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,  
ул. Октябрьская, д. 21  
Тел.: +7 (916) 926-09-16  
E-mail: mai-Serpuhov@mail.ru

### Аннотация

В статье представлен обзор по проблеме компетентности преподавателя при реализации смешанного обучения в условиях цифровой трансформации образования. Показано, что проблему можно решать за счет интеллектуализации электронных образовательных ресурсов (ЭОР) смешанного обучения путем применения адаптивных алгоритмов управления ЭОР, позволяющих реализовать авторскую методику обучения. Представлены подходы к формированию таких алгоритмов и отечественные программные среды, позволяющие реализовать алгоритмы.

**Ключевые слова:** электронный образовательный ресурс, цифровая трансформация; образовательный ресурс; смешанное обучение; авторская методика обучения; алгоритмы обучения; управления, нейронные сети.

### Summary

The article provides an overview of the problem of teacher competence in the implementation of blended learning in the context of the digital transformation of education. It is shown that the problem can be solved by intellectualization of electronic educational resources (EER) of blended learning by using adaptive EER control algorithms that allow implementing the author's teaching methodology. Approaches to the formation of such algorithms and domestic software environments that make it possible to implement the algorithms are presented.

**Keywords:** digital transformation; educational resource; blended learning; author's teaching methodology; learning algorithms; management; neural networks.

Влияние цифровой трансформации распространяется на всю сферу образования по следующим направлениям: учебно-воспитательный процесс, процессы создания и использования электронных или цифровых образовательных ресурсов, корректировка состава информационно-образовательной среды (высокотехнологичные программно-аппаратные средства и устройства, в том числе мобильные, средства обеспе-

чения удаленного доступа к образовательному контенту, цифровой образовательный ресурс, средства и системы автоматизации администрирования и управления образовательной организацией [1].

В этих условиях формируется концепция смешанного обучения, соединяющая в себе достоинства традиционного и дистанционного образовательного процесса [3].

Следует отметить, что на сегодняшний день имеется ряд проблем с реализацией образовательных программ в новом формате [3]:

- на сегодняшний день для российских университетов актуальна проблема несоответствия между качеством цифровых образовательных сред вузов и потребностями экономики в конкурентоспособных специалистах, освоивших цифровые компетенции;

- преобладании неформального взаимодействия обучающихся с преподавателями университета (в социальных медиа, мессенджерах);

- более распространены «традиционные» цифровые технологии сопровождения процесса обучения, которые предполагают размещение общих, деперсонализированных сведений.

Применение в смешанном обучении неконтактных методов обучения, когда общение преподавателя и студентов осуществляется в опосредованной электронной форме [3], приводит к тому, что у преподавателей ощущается недостаток перцептивной обратной связи со студентами, нет возможности отслеживать реакцию студентов на презентационные материалы, не хватает диалога с аудиторией, живого эмоционального отклика, визуального контакта [3]. Неконтактные методы обучения, при всех их достоинствах, вступают в противоречие с реальной жизнью, с профессиональной деятельностью педагога, и как следствие, с авторскими педагогическими методиками.

Таким образом, можно сделать вывод, что этот сложный образовательный процесс требует соответствующего ресурсного обеспечения.

Отмечая невысокий уровень готовности преподавателей к цифровой трансформации образования в профессиональном обучении [3], следует отметить, что смешанное обучение помогает преподавателям понять, насколько электронное обучение уместно в получении знаний и формировании компетенций у будущих специалистов, если преподаватель будет использовать понятный ему цифровой ресурс, который позволит ему реализовать авторские педагогические методики.

Все большую роль начинает играть электронный образовательный ресурс [4], представленный в виде электронных учебников, электронных конспектов лекций, компьютерных моделей лабораторных работ, презентаций элективных дисциплин, электронных комментариев по результатам проверки контрольных работ, компьютерных тестов [5].

Анализ ситуации показывает, что основные проблемы на пути широкого применения ЭОР в высшем профессиональном образовании заклю-

чаются в наличии адаптивных, учитывающих личностные особенности стратегий обучения, и отсутствия, пригодных к применению в условиях активного использования в образовательной среде вуза информационных и коммуникационных технологий.

При создании ЭОР следует учитывать комплекс многовариантных действий в следующих областях: педагогическое проектирование ЭОР в соответствии с авторскими методиками преподавания, проектирование контента, разработка прикладной программы, реализующей составляющие контента и интерфейс ЭОР, который завершается получением нового (или модификацией существующего) ЭОР, описанием нереализованных интерактивных анимационных, звуковых, видео компонентов контента ЭОР. Данный комплекс действий охватывает: определение педагогической цели использования ЭОР в учебном процессе, разработку содержания, сценария обучения, подготовку текстовых, графических, аудио-, видео- компонентов контента, объединение компонентов в ЭОР. При этом необходимо учитывать создание преподавателями авторских ЭОР для использования их при реализации собственных методик преподавания, создание ЭОР преподавателями вузов, не имеющими специального образования в области информатики.

Однако в большинстве случаев не рассматривается разработка и использование инструментальных средств, применение которых обеспечивает преподавателям создание ЭОР для реализации авторских методик преподавания, удовлетворяющих педагогическим и технологическим требованиям, не требующих специальных знаний и умений.

Под адаптивным инструментальным комплексом будем понимать взаимосвязанные между собой инструментальные средства, состав и алгоритм функционирования которых может изменяться в целях достижения соответствия создаваемых ЭОР педагогическим и технологическим требованиям к ним. Эти средства должны обеспечивать соответствие контента ЭОР авторским методикам преподавания, интерактивное взаимодействие между участниками процесса обучения, автоматизированного контроля знаний, умений, технологические требования к функционированию ЭОР, а также функциональные требования к инструментальным комплексам, обеспечивающим автоматизацию проектирования контента, разработки прикладных программ ЭОР.

В соответствии со сформулированными выше педагогическими требованиями можно

определить требования к структуре контента, который предполагает наличие следующих компонентов: презентация дисциплины, контактная информация, структура дисциплины, в том числе трудоемкость в зачетных единицах, требования к формируемым знаниям, умениям и компетенциям, перечень лекционных, практических, лабораторных и семинарских занятий, формы текущего и итогового контроля, учебно-методическое и практико-ориентированное обеспечение (материалы лекционных, практических, лабораторных и семинарских занятий с применением различных форм аудиовизуальной информации), индивидуальные интерактивные задания для самостоятельной работы с обратной связью, тезаурус и исторические данные предметной области, проблемные задания для курсовых и дипломных работ, перечень литературы и информационных источников, материалы для самоконтроля, коррекции и контроля, создания ЭОР на базе комплекса инструментальных средств, состав которого формируется в зависимости от педагогических и технологических требований к ЭОР. В этой связи предлагается при создании ЭОР использование инструментальных средств, формируемых в виде адаптивных инструментальных комплексов с минимально изменяемым интерфейсом пользователя и разрабатываемых на базе исходных кодов программ-образцов, соответствующих сформулированным педагогическим и технологическим требованиям к ЭОР. Функциональные требования к предлагаемым адаптивным инструментальным комплексам должны обеспечивать преподавателям условия для автоматизации проектирования контента и разработки прикладных программ ЭОР: наличие минимально необходимого интуитивно понятного графического интерфейса пользователя, возможность выбора из встроенных шаблонов и стилей различных типов и вариантов оформлений ЭОР, соответствующих сформулированным педагогическим и технологическим требованиям, обеспечение автоматического выделения фрагментов текстовых учебно-методических и контролирующих материалов, компоновка выделенных фрагментов в контент ЭОР, возможность редактирования выделенных фрагментов посредством встроенных текстовых и графических редакторов, возможность совершенствования ЭОР (добавление графических, аудио-, видео-фрагментов, текстовых фрагментов) специалистами в области информатики с применением дополнительных инструментальных средств [5].

Основным условием успешного обучения с

применением ЭОР является взаимная адаптирующая функциональная деятельность среды и обучающихся, подразумевающая, с одной стороны, приспособление обучающегося к новым условиям обучения в информационно-образовательной среде, с другой стороны – приспособление условий и содержания, средств и методов обучения, заложенных в алгоритмах работы ЭОР, к индивидуальным особенностям студентов.

Адаптация студента к электронной информационно-образовательной среде основана на индивидуализации обучения с оценочной обратной связью и обусловлена целенаправленным взаимодействием на сознание студента алгоритмов работы ЭОР.

В системах искусственного интеллекта такое обучение называют обучением с подкреплением – самообучением тому, что надо делать, чтобы отобразить ситуацию в действия с целью максимизировать некоторый сигнал поощрения (вознаграждения), принимающий числовые значения. В данном случае происходит постепенное расширение зоны ближайшего развития студента, когда обучающийся последовательно начинает самостоятельно организовывать свою учебную деятельность в электронной среде, обобщать и систематизировать учебный материал, анализировать и оценивать достигнутые образовательные результаты.

Проведенный анализ теории и практики создания ЭОР на базе адаптивных инструментальных комплексов, на примере специально создаваемых интернет-порталов (в России это «Интуит», Coursera, «Открытое образование»), показал, что в условиях активного применения ИКТ и электронных образовательных ресурсов, дидактическим средством управления индивидуализацией обучения выступает использование онлайн-оценивания [3]. Но нужно применять адаптивное тестирование, ориентированное на психолого-физиологическое состояние студента, реализованное в сетевых электронных учебно-методических комплексах по специальным алгоритмам.

Такой подход позволит учитывать уровень и структуру начальной подготовленности, индивидуальных особенностей обучающихся и даст возможность оперативно отслеживать результаты текущей подготовки и выстраивать персонализированную образовательную траекторию при освоении учебного материала электронного ресурса.

Нейросетевая модель, моделирующая деятельность педагога при оценке знаний обучаемых, на основе пакета прикладных программ, реализующих возможности нейросетевых тех-

нологий в интеллектуальных системах образовательного назначения требует разработка методики настройки интеллектуальных систем на основе обобщения результатов контроля при обучении конкретным учебным дисциплинам и методики формирования обучающихся выборок для настройки нейросетевых систем образовательного назначения. Такой подход предполагает методологию создания адаптивных семантических моделей слабо структурированных междисциплинарных областей знаний, что предполагает создание теоретической основы разработки баз знаний в интеллектуальных обучающих системах [2].

Подготовка адаптивной модели и методов представления и контроля знаний в автоматизированной системе информационной поддержки управления образовательным процессом, методики формирования содержания учебных дисциплин может осуществляться на основе методов линейного и динамического программирования.

Адаптационный блок можно реализовать на основе следующих алгоритмов:

- разработка модели управления на основе математического аппарата линейного программирования;
- разработка модели управления на основе искусственных нейронных сетей;
- разработка квалиметрической модели управления на основе результатов тестирования.

Первый и второй типы алгоритмов работы адаптивного блока интеллектуальной поддержки подсистемы управления обучением предполагают знание основ программирования педагогами – разработчиками содержания учебных курсов электронно-информационных образовательных сред.

С другой стороны, преподаватель всегда оценивает знания обучаемого в диалоге с ним, (зачеты, экзамены), задает вопросы и оценивает ответы. Поэтому тестирование является элементом его педагогического мастерства.

Разработка квалиметрической модели управления на основе результатов тестирования требует определение типа модели обучаемого с помощью трех тестов – слабый, нормальный, успевающий и выбранного сценария обучения (дедуктивный, индуктивный и гибридный) предлагается использовать три вектора обучения («медленный», «нормальный» и «быстрый»).

Алгоритмы адаптивного обучения.

Поддержка пользователя по ходу обучения. Есть несколько типов задания: сложное (целе-

вое), попроще, наипростейшее. Студенту дают либо сначала первое, и если не справился, то постепенно понижают сложность, пока не справится, а потом повышают обратно, пока не пройдет целевое. Или дают сначала самое простое, а потом постепенно усложняют, пока он не справится с самым сложным.

Повторение по кривой забывания. Система запоминает, когда пользователь столкнулся с той или иной темой и как ее решил. Если хорошо решил – знает нормально, повторим попозже. Если плохо решил – слабо знает или вообще не знает, повторим пораньше. На основании этого система строит график, когда обучаемому дадут для повторения ту или иную тему, слово, термин и т.д.

Конструктор правил. Преподаватель – эксперт/создатель программы обучения вручную настраивает реакции системы на действия пользователя. Например, «если пользователь ответил неправильно», покажи ему оценку ответа, «если пользователь провел на этой странице больше 30 секунд», выдай вот это сообщение» и т.д.

Актуальным становится вопрос создания ЭОР на основе имеющегося или подготовленного, адаптированного, согласно запросам пользователя, российского программного обеспечения и разработки отечественной технологической основы (методик, приемов, современных обучающих средств) для проектирования и сопровождения познавательной деятельности.

Учитывая требования указов Президента РФ «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» [7], «О мерах по обеспечению технологической независимости и безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» [8], обязывающих все государственные ведомства и учреждения к 1 января 2025 года перевести свои ИТ-системы на отечественный софт, и постановления всех министерств России во исполнение этого указа, предпочтительным остается использование готового программного обеспечения – инструментария для создания конкретного ЭОР, сертифицированного в России и зафиксированного в реестре российского ПО.

Анализ систем из этого реестра, удовлетворяющий всем перечисленным в статье педагогическим и педагого-технологическим требованиям позволил выделить кроссплатформенный пакет программ для создания и просмотра электронных книг SunRav BookOffice XT [6].

Кроссплатформенный пакет программ для

организации тестирования в учебных заведениях и на предприятиях TestOfficePro XT.

Программный продукт SunRav WEB Class – профессиональный программный продукт для организации онлайн обучения.

Комплекс этих инструментов позволяет реализовать цифровую трансформацию образования в контексте аксиологического подхода к созданию и функционированию высокотехнологической цифровой информационно-образовательной среды на основе адаптации ЭОР к психофизиологическим возможностям личности обучаемого, к его базе знаний.

Таким образом, реализовать компетенции педагогических кадров в области смешанного обучения, в условиях цифровой трансформации образования, в применении авторских методик обучения возможно с помощью интеллектуализации электронных образовательных ресурсов на основе создания адаптивных алгоритмов управления работой ЭОР.

Авторские методики обучения могут быть представлены:

- моделями управления на основе математического аппарата линейного или динамического программирования;

- моделями управления на основе ИИ – искусственных нейронных сетей;

- адаптивными семантическими моделями слабо структурированных междисциплинарных областей знаний;

- квалитетическими моделями управления на основе результатов тестирования знаний и умений обучаемых.

Возможно использование комбинированных моделей.

Для создания адаптивных ЭОР преподавателями вузов, не имеющих специального образования в области информатики, для реализации авторских методик преподавания, удовлетворяющих педагогическим и технологическим требованиям, и не требующих специальных знаний и умений, предлагается использовать готовое отечественное программное обеспечение, реализующее рассмотренные адаптивные модели управления [6].

Отечественное программное обеспечение требуется применять во исполнение Указов Президента РФ [7,8], постановлений правительства и министерств России.

Для создания ЭОР предлагается применять инструментальные средства – кроссплатформенный пакет программ для создания и просмотра электронных книг SunRav BookOffice XT, кроссплатформенный пакет программ для органи-

зации тестирования в учебных заведениях и на предприятиях TestOfficePro XT, SunRav WEB Class – профессиональный программный продукт для организации онлайн обучения [9].

### Литература

1. Роберт И.В. Цифровая трансформация образования: ценностные ориентиры, перспективы развития // Россия: тенденции и перспективы развития, 2021. №16-1. С.869.
2. Роберт И.В. Перспективные научные исследования, определяющие развитие информатизации образования // Педагогическое образование в России, 2014. №4. С.199-204.
3. Козлов О.А., Новикова И.В., Мацуй Н.В., Положенцева И.В. Развитие смешанного обучения в образовательных организациях высшего образования в условиях цифровой трансформации образования // Современное педагогическое образование, 2022. №4. С.15-20.
4. Козлов О.А., Михайлов Ю.Ф. Организационно-методические аспекты цифровой трансформации образования в вузе в условиях дистанционного обучения // Вопросы методики преподавания в вузе, 2021. Т.10. №36. С.56-64.
5. ГОСТ Р 52653-2006. Информационно-коммуникационные технологии в образовании. Термины и определения [Электронный ресурс] // URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200053103> (дата обращения: 25.09.2022).
6. Реестр программного обеспечения. Единый реестр российских программ для электронных вычислительных машин и баз данных [Электронный ресурс] // URL: <https://reestr.digital.gov.ru> (дата обращения: 25.09.2022).
7. Указ Президента РФ от 07.05.2018 №204 «О национальных целях и стратегических задачах развития РФ на период до 2024 года», пункт 11 [Электронный ресурс] // URL: <https://base.garant.ru/71937200/?ysclid=18n3r4hmo219862136> (дата обращения: 29/09/2022).
8. Указ Президента РФ от 30.03.2022 №166 «О мерах по обеспечению технологической независимости и безопасности критической информационной инфраструктуры РФ», пункт 16) [Электронный ресурс] // URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202203300001?ysclid=18n3ufddiu465534769> (дата обращения: 29/09/2022).
9. Козлов О.А., Михайлов Ю.Ф. Реализации компетенций педагогических кадров в области смешанного обучения в условиях цифровой трансформации образования с помощью интеллектуализации ЭОР на основе создания адаптивных алгоритмов / Педагогическая информатика, 2022. №3. С.139-147.



**Atakishchev Eduard I.** Deputy Chief Engineer for Operation of Kursk NPP 2. Moscow, Ferghanskaya str., 25.

**Atakishchev Kirill E.** Engineer of BCP-6 Engineering division JSC Atomenergoproekt. Moscow, Bakuninskaya str., 7, p. 1.

**Atakishchev Oleg I.** Honorary Worker of Science and High Technologies of the Russian Federation. Doctor of Technical Sciences, Professor. Deputy General Director for Special Projects. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoi Udarney I., 1a.

**Boronenkov Alexander I.** Candidate of Technical Sciences, Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation

**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 I., 1a.

**Burakov Ilya I.** Undergraduate student of the department «Information Processing Systems» Bauman State Technical University (Kaluga Branch). Kaluga, St. Bazhenova, 2.

**Butrina Elena P.** Head of the LISZI group, Interregional Educational Institution. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarney I., 1a.

**Druzhinin Ivan M.** Candidate of Technical Sciences, docent of chair . Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Egorov Vladislav V.** Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarney I., 1a.

**Elistratov Vasily V.** Doctor of Technical Sciences, Head of the Department for the Development of Artificial Intelligence Technologies of the Ministry of Defense of the Russian Federation.

**Karpov Konstantin V.** Post-graduate. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Kazakov Rafehl' R.** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Onboard Information and Optoelectronic Space Vehicles. 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.

**Korobkov Alexey A.** Honorary worker of science and high technology of the Russian Federation. Candidate of

Technical Sciences, associate Professor, head of scientific and methodological Department. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarney I., 1a.

**Kulik Maksim V.** Senior Researcher of scientific and methodological Department. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarney I., 1a.

**Kuzin Evgeny N.** Candidate of Technical Sciences. Senior Researcher. Military Academy of Strategic Rocket Forces. Moscow Region, Balashikha, Karbysheva str., 8.

**Kvashennikov Vladislav V.** Doctor of Technical Sciences. Leading Researcher. JSC «Kaluga Research Institute of Telemechanical Devices». Kaluga, ul. K. Marx, 4.

**Lesnykh Vadim N.** Junior scientist. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

**Lychagov Alexander S.** Candidate of Technical Sciences, docent of chair. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Lysachev Mikhail N.** General Director of JSC «Consist-OS». Moscow, Projected passage № 4062, 6, p. 25.

**Makarova Larisa V.** Junior researcher of the 1st department of the 1st research center (special control). FGKU «12 central research institute» of the Ministry of Defense of Russia. Moscow reg., Sergiev Posad-7, Vesennaya str., 26.

**Mamontov Anton N.** Candidate of Technical Sciences. Leading researcher of the 1st research center (special control). FGKU «12 central research institute» of the Ministry of Defense of Russia. Moscow reg., Sergiev Posad-7, Vesennaya str., 26.

**Mazin Anatoly V.** Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of «Information Security». Kaluga Branch of Bauman MSTU. Kaluga, St. Bazhenova, 2.

**Medvedev Vladislav O.** Cadet. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Mikhailov Yuri F.** Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor. Associate Professor of the Department. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya St., 17.

**Movchan Valery O.** Serviceman. Ministry of Defense of the Russian Federation.

**Nakonechny Andrey B.** Graduate student. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarney I., 1a.

**Nazarenko Anatoliy V.** Honorary Worker of Education of the Russian Federation, assistant professor. Director of



the Training Center «Integration»» branch «Strela» MAI. Moscow reg., Serpukhov, st. Oktyabrskaya, 21.

**Nikulin Sergey S.** Graduate student. Bauman Moscow State Technical University. Moscow, 2-nd Baumanskaya St., 5-1.

**Oleinikov Vladimir P.** Candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate Professor. An expert LISZI. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarney I., 1a.

**Piskulin Igor V.** Lecturer. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Platonov Alexey O.** Graduate student. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

**Popov Alexandr V.** Adjunct of the Department. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Pushkarev Yuriy A.** The honoured worker of a science of the Russian Federation. Doctor of Technical Sciences. Professor. Professor of the Department. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Pushkareva Elena Yu.** 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.

**Sadekova Al'fiya A.** Junior Researcher of scientific and methodological Department. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarney I., 1a.

**Sal'ko Andrey E.** Laureate of the prize of the government of the Russian Federation in the field of science and technology. Doctor of Technical Sciences. Professor. Deputy Director General for science and technology policy and inter-structural communications. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarney I., 1a.

**Sergeev Viktor A.** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Onboard Information and Optoelectronic Space Vehicles. Military space Academy named after A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, ul. Zhdanovskaya, 13.

**Skryl Sergey V.** Doctor of Technical Sciences, Professor. Bauman Moscow State Technical University. Moscow, 2-nd Baumanskaya St., 5-1.

**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 Udarney I., 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 Udarney I., 1a.

**Stolbov Sergey N.** General manager. «Protyus» LLC. Moscow, Zelenograd, Shokin Square, 2, building 4.

**Sychev Artem M.** Doctor of Technical Sciences, Associate Professor. Bauman Moscow State Technical University. Moscow, 2-nd Baumanskaya St., 5-1.

**Turbal Ruslan A.** Candidate of Technical sciences. Chief of department of the informatively-measuring checking systems after nuclear explosions. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Tzar'kov Alexey N.** Honoured scientist of Russia, Doctor of Technical Sciences, professor. President of Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarney I., 1a.

**Vershinin Evgeny V.** Candidate of Physical and Mathematical sciences, docent. Head of «Information processing systems» Department. Kaluga Branch of Bauman MSTU. Kaluga, St. Bazhenova, 2.

**Volkov Gennadiy G.** Doctor of Physical and Mathematical Sciences. Professor. Senior Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarney I., 1a.

**Yushin Vadim V.** Candidate of Technical Sciences. Chief of the 1st department of the 1st research center. FGKU «12 central research institute» of the Ministry of Defense of Russia. Moscow reg., Sergiev Posad-7, Vesennaya str., 26.

**Zagarskih Vladimir I.** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. Senior Researcher. Military Academy of the Strategic Missile Force. Moscow Reg., Balashikha, Karbysheva st., 8.

**Zakharov Vladimir L.** Doctor of Military Sciences, professor. Full member of the Academy of Military Sciences. Professor. FSBEI of HE MAI (NRU). Moscow, Volokolamsk Highway, 4.

**Zelenevsky Vladimir V.** Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation Doctor of Technical Sciences, Professor, professor of the department. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Force. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Zelenevsky Yury V.** Doctor of Technical Sciences, associate professor. Researcher. Military Academy of the Strategic Missile Force. Moscow Reg., Balashikha, Karbysheva st., 8.



## ЭТИКА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

Редакционный совет и редакционная коллегия научно-технического журнала «Известия Института инженерной физики» придерживаются принятых международным сообществом принципов публикационной этики, отраженных, в частности, в рекомендациях Комитета по этике научных публикаций (Committee on Publication Ethics).

Все статьи, предоставленные для публикации в журнале «Известия Института инженерной физики», проходят рецензирование на оригинальность, этичность и значимость. Соблюдение стандартов этического поведения важно для всех сторон, принимающих участие в публикации: авторов, редакторов журнала, рецензентов, издателя.

### ОБЯЗАННОСТИ РЕДАКТОРА

**Редактор в своей деятельности обязуется:**

- постоянно совершенствовать журнал;
- следовать принципу свободы мнений;
- стремиться к удовлетворению потребностей читателей и авторов журнала;
- исключать влияние интересов бизнеса или политики на принятие решений об опубликовании материалов;
- принимать решения на основании принципа справедливости и беспристрастности, обеспечивать прозрачность редакционной деятельности на всех ее этапах;
- не раскрывать информацию о предоставленных материалах никому, кроме соответствующих авторов, рецензентов, других редакционных консультантов;
- оценивать рукописи исключительно по их научному содержанию;
- принимать решение о публикации материалов, руководствуясь следующими главными критериями: соответствие рукописи тематике журнала; актуальность, новизна и научная значимость представленной статьи; ясность изложения; достоверность результатов и законченность выводов. Качество исследования и его актуальность являются основой для решения о публикации;
- принимать меры для обеспечения высокого качества публикуемых материалов и защиты конфиденциальности персональной информации. При обнаружении содержательных, грамматических, стилистических и иных ошибок редакция обязуется предпринимать все меры для их устранения;
- обосновать свое решение в случае принятия или отклонения статьи;
- предоставить автору рецензируемого материала возможность для обоснования своей исследовательской позиции;
- поощрять дискуссии и предоставлять возможность для изложения точки зрения оппонентов;
- не использовать в собственных исследованиях информацию из неопубликованных материалов.

### ОБЯЗАННОСТИ ЧЛЕНОВ РЕДСОВЕТА (РЕДКОЛЛЕГИИ)

**Решение о публикации.**

Редсовет (редколлегия) журнала «Известия Института инженерной физики» являются ответственными за принятие решения о том, какие статьи будут опубликованы в журнале. Решение принимается на основании представляемых на статью рецензий

Редсовет (редколлегия) придерживаются политики журнала и действуют в рамках законных требований, поскольку несут ответственность за нарушение авторских прав.

### Конфиденциальность.

Рецензенты или кто-либо из сотрудников редакции не должны разглашать никакую информацию о предоставленной рукописи кому-либо, кроме самого автора, рецензентов, потенциальных рецензентов, членов редакционного совета (коллегии) и издателя, поскольку она является конфиденциальной.

### Раскрытие информации и конфликт интересов.

Неопубликованные материалы, находящиеся в предоставленной статье, не должны быть использованы в собственном исследовании научного редактора и рецензентов без специального письменного разрешения автора.

### ОБЯЗАННОСТИ РЕЦЕНЗЕНТОВ

Рецензенты оказывают помощь членам редакционного совета (редколлегии) при принятии редакционного решения, а также помогают автору усовершенствовать работу.

### Конфиденциальность.

Любые рукописи, полученные для рецензирования, должны восприниматься как конфиденциальные документы. Они не могут быть показаны либо обговорены с другими лицами, кроме тех, которые уполномочены редакцией.

### Подтверждение источников.

Рецензенты должны идентифицировать опубликованную работу, которая не была процитирована автором. Любое утверждение, что наблюдение, происхождение либо аргумент ранее были сообщены, необходимо сопровождать соответствующей ссылкой. Рецензент должен также донести до сведения редакции о любой существенной схожести или частичном совпадении между рукописью, которая рецензируется, и другой уже опубликованной работой, которая ему знакома.

### Раскрытие информации и конфликт интересов.

Приватная информация или идеи, возникшие в процессе рецензирования, должны остаться конфиденциальными и не могут быть использованы в личных интересах. Рецензент не должен рассматривать рукопись, если имеет место конфликт интересов в результате его конкурентных, партнерских либо других отношений или связей с кем-либо из авторов, компаний или организаций, связанных с материалом публикации.

### ОБЯЗАННОСТИ АВТОРОВ

#### Оригинальность и плагиат.

Авторы должны гарантировать, что они написали полностью оригинальную работу. Если авторы использовали работу и/или слова других авторов, это должно быть соответственно указано и процитировано.

#### Доступ к данным и сохранность.

Автор должен быть готов обеспечить доступ к данным, связанными с материалом публикации, если таковой возможен. Во всяком случае, автор должен быть готов сохранять такие данные на протяжении разумного периода времени после опубликования.

#### Многоразовая, избыточная или конкурирующая публикация.

Автор не должен публиковать работы, которые описывают по сути одно и то же исследование, более чем один раз или более чем в одном журнале.

Предоставление рукописи более чем в один журнал одновременно означает неэтичное издательское поведение и является недопустимым.

#### Подтверждение источников.

Необходимо предоставлять должное подтверждение работ других авторов. Авторы должны процитировать публикации, которые имели значение при создании заявленной работы.

#### Авторство материала.

Авторство необходимо ограничить теми лицами, которые внесли ощутимый вклад в концепцию, проект, исполнение или интерпретацию заявленной работы. Всех, кто внес ощутимый вклад, следует внести в список соавторов.

Автор должен гарантировать, что список авторов содержит только действительных авторов и в него не внесены те, кто не имеет отношения к данной работе, а также то, что все соавторы ознакомились и одобрили окончательную версию статьи и дали согласие на ее публикацию.

#### Раскрытие информации и конфликт интересов.

Все авторы должны сообщать, если в их работе имеется финансовый либо другой конфликт интересов, который может повлиять на результаты или интерпретацию их рукописи.

#### Ошибки в опубликованных работах.

Если автор обнаружит существенную ошибку или неточность в своей опубликованной работе, его обязанность – незамедлительно сообщить об этом в редакцию журнала или издателю и сотрудничать с редакцией при исправлении ошибок.

#### НАРУШЕНИЯ

При возникновении ситуации, связанной с нарушением публикационной этики со стороны редактора, автора или рецензента, требуется ее обязательное рассмотрение. Редакционный совет (редколлегия) обязана потребовать разъяснения, без привлечения лиц, которые могут иметь конфликт интересов с одной из сторон.

Если материал, содержащий значительные неточности, был опубликован, он должен быть незамедлительно исправлен в форме, доступной для читателей и систем индексирования.

## ТРЕБОВАНИЯ К АВТОРАМ СТАТЕЙ

Для публикации принимаются статьи на русском языке. Рекомендуемый объем статьи – 0,2–0,4 п.л. (8000–16000 знаков).

Тексты должны быть представлены:

- в электронном виде (Word 2003). Иллюстративный материал (сложные формулы, рисунки, фотографии и т.д.) кроме размещения в тексте обязательно должны предоставляться отдельными файлами!

- на бумажном носителе формата А4.

Текст статьи должен быть набран через 1,5 интервала (гарнитура «Times New Roman»), кегль 14.

**Простые символы и формулы не набирать в математическом редакторе!**

Напечатанный текст должен иметь поля: верхнее и левое – 2,5 см, правое и нижнее – 2 см.

Вверху первой страницы статьи размещаются:

- рубрика журнала (см. Приложение 1);
- УДК;
- название статьи с переводом на английский язык;
- имя, отчество, фамилия автора (авторов), ученая степень, ученое звание, должность и место работы.

Список литературы (Литература) размещается в конце статьи.

После литературы помещаются:

- список ключевых слов, краткая аннотация (на русском и английском языках).

Завершает рукопись полная информация об авторе (авторах):

- ФИО;
- ученая степень, ученое звание, должность и место работы с переводом на английский язык;
- адрес места работы, контактные телефоны, электронный адрес (по желанию автора – домашний адрес и телефон).

**Обращаем особое внимание на:**

- точность и правильность библиографического оформления списка литературы (в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008);
- выверенность статьи в компьютерном наборе;
- полное соответствие файла на электронном носителе и бумажного варианта.

Редакционная коллегия оставляет за собой право на редактирование статей, при этом с точки зрения научного содержания авторский вариант сохраняется.

Статьи, не принятые к публикации, не возвращаются. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается!

#### Приложение 1

#### РУБРИКАЦИЯ ЖУРНАЛА

«Известия Института инженерной физики»

#### Постоянные рубрики

- **Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы.**
- **Радиотехника и связь.**
- **Информатика, вычислительная техника и управление.**

#### Разовые рубрики

- **Техника специального назначения.**
- **Инновационные проекты.**
- **Техническое регулирование.**
- **Профессиональное образование.**
- **Искусственный интеллект и робототехника.**
- **Медицина и фармацевтика.**
- **Диагностические системы.**
- **Научные обзоры. Научные рецензии. Отзывы.**

В соответствии с Решением Межведомственной комиссии РФ по защите государственной тайны №69 от 26 февраля 2001 г., требованиями законов №5485-1 «О государственной тайне» от 21 июля 1993 г., №149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и защите информации» от 27 июля 2006 г. статьи для публикации принимаются только при наличии экспертного заключения с разрешением на открытое опубликование.



# AUTONOMOUS NON-PROFIT ORGANIZATION “INSTITUTE OF ENGINEERING PHYSICS”

## CONTENTS

### **INSTRUMENT MAKING, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES AND SYSTEMS**

**Zakharov V.L., Smirnov D.V., Sergeev V.A.**

Methodology for ensuring the compliance of the parameters of the onboard optoelectronic means with the given requirements ..... 2

**Korobkov A.A., Kulik M.V., Sadekova A.A.**

Method for parametric calculation of twisted heat exchangers designed to produce liquefied methane used as a fuel in rocket and space technology..... 6

**Kolombet V.A., Platonov A.O., Lesnykh V.N.**

Monitoring the multivibrator period as a way of studying the universal period-tripling system ..... 13

**Smurov S.V., Sal'ko A.E., Zagarskih V.I., Kuzin E.N.**

Low-pulse safety-type initiating device for on-board automatics of rocket and space technology ..... 20

### **RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATION**

**Zelenevsky V.V., Zelenevsky Y.V., Egorov V.V., Nakonechny A.B., Popov A.V.**

A method for assessing the noise immunity of a radio channel with code compaction of data and spectrum expansion under the influence of pulsed intermittent interference ..... 24

**Kvashennikov V.V.**

Linear stochastic noise-resistant codes in the erasing communication channel ..... 29

### **INFORMATION SCIENCE, COMPUTING AND MANAGEMENT**

**Smurov S.V.**

Bit permutation generation method using array of control variables ..... 35

**Zakharov V.L., Smirnov D.V., Kazakov R.R.**

On the influence of the angular motion of the separating parts of promising launch vehicles on the deviation of possible points of impact into a given area ..... 40

**Pushkarev Y.A., Pushkareva E.Y., Piskulin I.V.**

Control of a robotic complex along the course angle based on the method of speed difference ..... 45

**Lychagov A.S., Druzhinin I.M., Karpov K.V.**

Crossroads of roads as a source of information for correction of the navigation system of a moving object ..... 52

**Skryl S.V., Mazin A.V., Sychev A.M., Boronenkov A.I., Nikulin S.S.**

Functional modeling as a tool for formalizing the process of interception of re-emitted high-frequency signals modulated by informative acoustic signals ... 57

**Smurov S.V., Volkov G.G., Stolbov S.N.**

Violation of Bell's inequalities in quantum physics at low and high energies ..... 62

**Smirnov D.V., Atakishchev O.I., Lysachev M.N., Atakishchev E.I., Atakishchev K.E., Movchan V.O.**

Features of application of metagrammars for modeling of complex structured processes of functioning of automated control systems of technological processes of nuclear power plants ..... 72

**Butrina E.P., Oleinikov V.P.**

Object security: event-based threat model ..... 78

**Yushin V.V., Mamontov A.N., Makarova L.V., Turbal R.A., Medvedev V.O.**

Method of identification of weak seismic sources at regional distances on the example of the station of the international monitoring system NVAR ..... 83

**Vershinin E.V., Burakov I.I.**

Ways to identify fires in images ..... 87

### **ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND ROBOTICS**

**Bugakov I.A., Elistratov V.V., Tsar'kov A.N.**

On the signs and levels of artificial intelligence. Part 1. Conceptual foundations ..... 92

### **SCIENTIFIC REVIEWS. SCIENTIFIC CRITIQUES. COMMENTS**

**Mikhailov Y.F., Nazarenko A.V.**

Overview of the directions of intellectualization of electronic educational resources based on the creation of adaptive algorithms ..... 102

**AUTHORS** ..... 107

**THE ETHICS OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS** ..... 109

**REQUIREMENTS TO AUTHORS** ..... 110

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 «ИИФ».

Адрес: 142210, Московская обл., г.о. Серпухов, г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а, стр. 1.

Подписано в печать 16.12.2022.

Дата выхода в свет 25.12.2022. Тираж 2000 экз. Цена свободная.

© Автономная некоммерческая организация «Институт инженерной физики», 2022.



Автономная некоммерческая организация  
«Институт инженерной физики»