

№ 3<sup>+0</sup>  
2018 [49]

научно-технический журнал

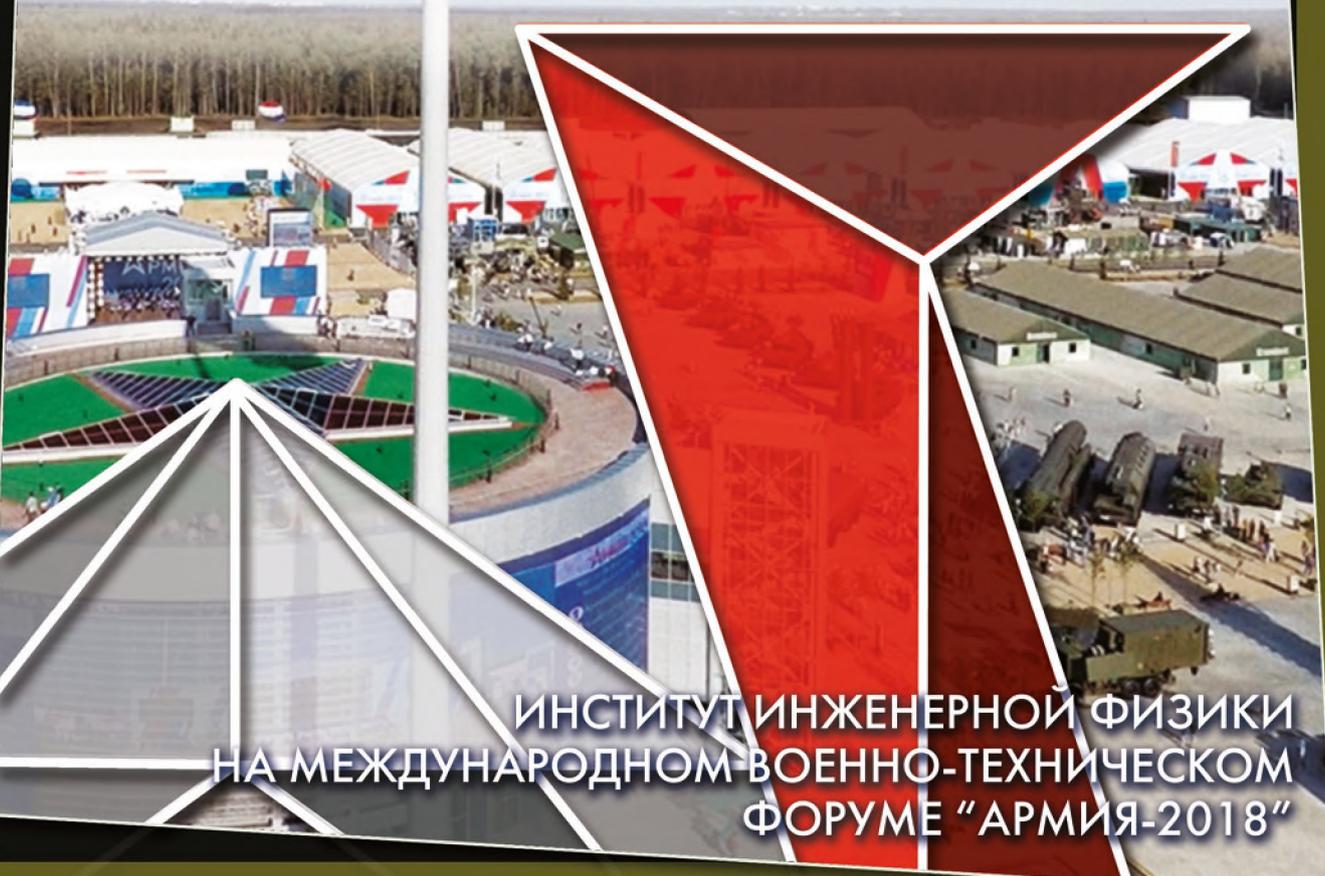
# ИЗВЕСТИЯ

ИНСТИТУТА ИНЖЕНЕРНОЙ ФИЗИКИ



# АРМИЯ

МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ФОРУМ



ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРНОЙ ФИЗИКИ  
НА МЕЖДУНАРОДНОМ ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКОМ  
ФОРУМЕ "АРМИЯ-2018"



**В НОМЕРЕ**

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

- 2** **Порядин А.Ю., Аксёнов В.Е., Пискулин Е.В.**  
Быстродействующая комплексная предстартовая калибровка акселерометров с нелинейной оптимальной оценкой их параметров при подвижной точке разложения системы нелинейных функций
- 6** **Непейпиев А.Г.**  
Математическая модель дизель-генераторной установки комбинированного типа
- 11** **Кучменко Т.А., Грибоедова И.А. Порядина Д.А.**  
Разработка экспрессного способа микрограмметрического определения фактических смол в бензинах
- 17** **Попов А.Г., Агеев А.В., Оленевская Е.О.**  
Методика оценки надежности и прогнозирования остаточного ресурса сосудов высокого давления объектов ракетного вооружения для обеспечения длительной безаварийной эксплуатации по текущему техническому состоянию
- 21** **Анфимов И.М., Варлачев В.А., Дробышевский Ю.В., Кобелева С.П., Столбов С.Н., Волков Г.Г., Некрасов С.А., Дунилин В.М.**  
Регистрация эффекта селективной сепарации тепловых нейтронов: обоснование, эксперименты
- 27** **Богданов М.Б., Макалов А.О.**  
Калибровка аддитивной погрешности и неперпендикулярности измерительных осей двухосевого магнитометра
- 31** **Прохорцов А.В.**  
Метод повышения точности определения параметров ориентации путем совместной обработки сигналов БИНС и приемной аппаратуры СНС с применением одной антенны по сигналам с трех и более навигационных спутников

**РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ**

- 37** **Глазов Д.Н.**  
Методика применения способов однопунктной дальнометрии при оценке их погрешностей
- 40** **Сальников Д.В., Мешков И.С., Климов И.С.**  
Прогнозирование доступности глобальной навигационной спутниковой системы в зависимости от варьируемого угла радиовидимости навигационных космических аппаратов
- 46** **Зеленевский В.В., Зеленевский Ю.В., Зеленевский А.В., Шмырин Е.В., Дурнов А.С.**  
Каскадное кодирование данных с параллельными ортогональными внутренними кодами
- 50** **Атакищев О.И., Костогрызов А.И., Аджемов С.С., Атакищев А.О.**  
Метаграмматическая модель и метод декодирования префиксных кодированных данных
- 57** **Кулешов В.В.**  
Алгоритм преобразования аналоговой информации в цифровой код в измерительной системе

**ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

- 60** **Лобов И.В., Готман В.Г.**  
Система трансляций презентаций в реальном времени над протоколом HTTP
- 67** **Ахмедов Т.Х., Пономарёва А.С.**  
Угол, образованный скрещивающимися векторами ускорений и скоростей в пограничном слое быстромашущего крыла
- 70** **Волков В.З.**  
Обнаружение ошибок в арифметико-логических устройствах специализированных ЭВМ
- 77** **Монахов Ю.М., Артюшина Л.А., Маков Е.О., Исмаилова М.Р.**  
Модель интеллектуальной диалоговой системы для автоматизированного заказа билетов на основе семантического анализа
- 82** **Грибунин В.Г., Ридли М.К., Рязанцев А.М., Смирнов Д.В.**  
О программной системе скрытой передачи данных в изображениях формата JPEG-2000
- 88** **Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В.**  
Универсальная система утраивающихся периодов и музыкальный строй
- 91** **Каракашев А.В., Смирнов Я.Д.**  
Использование ложных информационных систем – перспективное направление защиты информационных систем от атак «нулевого» дня
- 94** **Стародубцев П.Е., Бухаров Е.О., Соколовский Е.П.**  
Управление запасами ключей криптографического обмена на основе алгоритма нечеткого логического вывода Сугено

**ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЕКТЫ**

- 97** **Емелин Н.М., Карулин В.П.**  
Обобщенная оценка соответствия научных изданий требованиям, предъявляемым к рецензируемым научным изданиям

**101** **AUTHORS**

**103** **ЭТИКА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ**

**104** **ТРЕБОВАНИЯ К АВТОРАМ СТАТЕЙ**

Научно-технический журнал

**ИЗВЕСТИЯ  
Института инженерной физики  
№3 (49) 2018**

Издается с апреля 2006 г. Выходит ежеквартально  
ISSN 2073-8110

Включен в «Перечень ВАК»  
по группам научных специальностей:  
05.11.00. Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы  
05.12.00. Радиотехника и связь  
05.13.00. Информатика, вычислительная техника и управление

Главный редактор,  
председатель редакционного совета  
и редакционной коллегии

**Алексей Николаевич Царьков**

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

Редакционный совет

**Геннадий Иванович Азаров**

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

**Сергей Владимирович Дворянкин**

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

**Николай Михайлович Емелин**

главный научный сотрудник  
ФГБНУ «Осметодцентр»,  
заслуженный деятель науки и техники РСФСР,  
доктор технических наук, профессор

**Валерий Иванович Николаев**

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

**Владимир Георгиевич Редько**

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

**Юрий Александрович Романенко**

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

**Александр Викторович Синьговский**

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

**Анатолий Васильевич Тодосийчук**

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

**Александр Павлович Царёв**

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

**Игорь Анатольевич Шеремет**

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

#### Редакционная коллегия

**Олег Николаевич Андрух**

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

**Борис Фёдорович Безродный**

доктор технических наук, профессор

**Сергей Борисович Беркович**

почетный геодезист РФ,  
доктор технических наук, профессор

**Владимир Эрнестович Бородай**

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

**Игорь Александрович Бугаков**

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

**Вадим Геннадьевич Грибунин**

почетный работник науки и техники РФ,  
доктор технических наук

**Сергей Григорьевич Данилюк**

доктор технических наук, профессор

**Владимир Владимирович Зеленевский**

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

**Николай Николаевич Казаков**

член Союза писателей России  
выпускающий редактор

**Олег Павлович Кузнецов**

кандидат технических наук, доцент

**Александр Ильич Куприянов**

доктор технических наук, профессор

**Анатолий Викторович Мазин**

доктор технических наук, доцент

**Алексей Сергеевич Марков**

доктор технических наук,  
старший научный сотрудник

**Дмитрий Геннадьевич Митрофанов**

заслуженный изобретатель РФ,  
доктор технических наук, профессор

**Роман Леонидович Мусатов**

кандидат технических наук  
заместитель главного редактора

**Игорь Николаевич Оков**

доктор технических наук, профессор

**Владимир Петрович Пашинцев**

заслуженный работник высшей школы РФ,  
доктор технических наук, профессор

**Дмитрий Вячеславович Смирнов**

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

**Сергей Владимирович Смуров**

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

**Валерий Николаевич Умников**

доктор технических наук, профессор

**Владимир Анатольевич Цимбал**

заслуженный деятель науки РФ,  
доктор технических наук, профессор

**Сергей Николаевич Шиманов**

почетный работник высшего профессионального  
образования РФ, почетный радист РФ,  
доктор технических наук, профессор



**Олег Николаевич Андрух**

заместитель Генерального директора  
по научно-методической работе  
МОУ «ИИФ»

почётный работник науки и техники РФ  
кандидат технических наук, доцент

В августе 2018 года Министерство обороны РФ проводит уже ставший традиционным Международный военно-технический форум (МВТФ) «Армия-2018». Уникальность форума заключается в том, что он предоставляет площадку для эффективного взаимодействия заказчикам новейших образцов вооружения и военной техники (ВВТ) для силовых ведомств страны, предприятиям оборонно-промышленного комплекса, представителям научных организаций, инвесторам. Проведение форума предполагает не только экспозицию ВВТ, но и широкую научно-деловую программу, а также демонстрацию возможностей современной военной техники на аэродроме «Кубинка» и полигоне «Алабино». Ежегодное проведение форумов позволяет наглядно демонстрировать насколько эффективно выполняется «Государственная программа вооружений 2020», насколько успешно реализуется национальная политика импортозамещения, являющаяся основой сохранения суверенитета РФ.

Активным участником и партнером МВТФ «Армия-2018» является Межрегиональное общественное учреждение «Институт инженерной физики». Коллектив Института представит на форуме ряд инновационных разработок, в том числе комплекс средств топогеодезического обеспечения, модное оборудование на основе технологии «программно-определяемое радио (SDR)», средства пассивного мониторинга состояния возмущенной ионосферы, охранные извещатели серии «TRAVERS», автономные системы пожаротушения на основе микрокапсульных газов, автономные локальные системы жизнеобеспечения на основе электрообогрева; автономные локальные системы технических объектов, медицинские препараты нового поколения и др.

Высокий уровень качества инновационных разработок МОУ «ИИФ» подтверждается золотой медалью и дипломом официального партнера и участника МВТФ «Армия-2017»; «Золотой звездой» «За достижения в области создания вооружения и техники РВСН» МВТФ «Армия-2017»; дипломом участника Международного салона «Комплексная безопасность-2018»; дипломом участника выставки «День передовых технологий правоохранительных органов РФ 2018» и многими другими, полученными за последние несколько лет.

Взаимный обмен передовыми достижениями в области науки, техники и технологий при решении проблемы импортозамещения позволяет создавать новые кооперационные связи между отечественными предприятиями, способствует не только гарантированному обеспечению обороноспособности РФ, но и активному развитию экономики страны.

От имени руководства Института инженерной физики желаю организаторам Международного военно-технического форума «Армия-2018» успехов в достижении поставленных целей, а коллективам научных организаций и предприятий оборонно-промышленного комплекса РФ – новых научных открытий, их эффективной технической реализации и в интересах силовых ведомств, и в интересах народного хозяйства.

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ



УДК 519.6

## БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩАЯ КОМПЛЕКСНАЯ ПРЕДСТАРТОВАЯ КАЛИБРОВКА АКСЕЛЕРОМЕТРОВ С НЕЛИНЕЙНОЙ ОПТИМАЛЬНОЙ ОЦЕНКОЙ ИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПОДВИЖНОЙ ТОЧКЕ РАЗЛОЖЕНИЯ СИСТЕМЫ НЕЛИНЕЙНЫХ ФУНКЦИЙ

## FAST-ACTING COMPLEX PRE- START CALIBRATION OF ACCELEROMETERS WITH NONLINEAR OPTIMAL ESTIMATION OF THEIR PARAMETERS AT A MOBILE POINT OF DECOMPOSITION OF A SYSTEM OF NONLINEAR FUNCTIONS

**Алексей Юрьевич Порядин**  
кандидат технических наук  
преподаватель  
филиал ВА РВСН имени Петра  
Великого (г. Серпухов)  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17  
Тел.: +7(977)-491-71-23  
E-mail: lex48205@mail.ru

**Виктор Ефимович Аксёнов**  
заслуженный деятель науки РФ,  
доктор технических наук, профессор  
профессор кафедры  
филиал ВА РВСН имени Петра  
Великого (г. Серпухов)  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17  
Тел. +7(4967)78-96-09

**Евгений Викторович Пискулин**  
кандидат технических наук  
доцент  
филиал ВА РВСН имени Петра  
Великого (г. Серпухов)  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17  
Тел. +7(906)-721-61-08

### Аннотация

В статье рассматривается быстродействующий способ калибровки акселерометров с нелинейной оптимальной оценкой их параметров при подвижной точке разложения системы нелинейных функций. Показана ориентация осей чувствительности акселерометров при их калибровке. Рассмотрен порядок составления и последовательность решения системы нелинейных уравнений наблюдения для определения погрешностей акселерометров.

**Ключевые слова:** калибровка акселерометров, система нелинейных функций, оценка параметров акселерометров, подвижная точка разложения.

### Summary

The paper deals with a fast-acting method of calibration accelerometers with nonlinear optimal estimation of their parameters at a mobile point of decomposition of nonlinear functions. Shows the orientation of axes of sensitivity of accelerometers under calibration. The procedures of preparation and the sequence of solving systems of nonlinear equations to determine the errors of the accelerometers.

**Keywords:** calibration of the accelerometers, the system of non-linear functions, estimation of parameters of the accelerometers, movable point of decomposition.

В сложной военно-политической обстановке быстродействие реагирования Вооруженных сил России в целом и РВСН, в частности, на военные угрозы недружественно настроенных стран является одним из наиболее значимых факторов сдерживания в военных конфликтах. В связи с этим необходимо сокращать время

подготовки к пуску современных межконтинентальных баллистических ракет, находящихся на вооружении в РВСН. При этом есть возможность сократить время проведения предстартовой калибровки акселерометров. Предлагается применять быстродействующую комплексную предстартовую калибровку акселерометров с не-

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

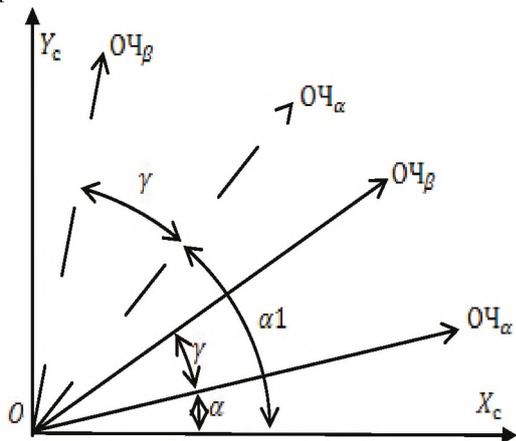
линейной оптимальной оценкой их параметров при подвижной точке разложения системы нелинейных функций.

При комплексной предстартовой калибровки оси чувствительности акселерометров устанавливаются последовательно в оптимальные технологические положения, определяемые заранее, а затем в рабочее (боевое) положение. В каждом положении производится одновременное определение среднего периода (частоты) следования импульсов на выходе калибруемых акселерометров «а» и «б». По совокупности измерений частоты следования импульсов составляем систему нелинейных уравнений наблюдения (СНУН). В результате решения системы определяем нелинейные оптимальные оценки масштабных коэффициентов и углов ориентации акселерометров [1,2]. По числу технологических положений комплексная предстартовая калибровка может быть быстродействующей – одно технологическое и одно рабочее (боевое) положение, и высокоточной – два технологических и одно рабочее (боевое) положение.

При быстродействующей калибровке выставляем оси чувствительности акселерометров в два положения гиростабилизированной платформы (ГСП).

Имеем два акселерометра «а» и «б», оси чувствительности которых расположены в одной вертикальной плоскости  $X_c O Y_c$  (рисунк 1).

Акселерометры установлены на вращающейся платформе, с помощью которой можно изменять положения их осей чувствительности в вертикальной плоскости.



**Рис. 1.** Положение осей чувствительности акселерометров «а» и «б» при быстродействующей калибровке

После выставки осей чувствительности акселерометров в соответствующие положения и измерений частоты следования импульсов в данных положениях получаем систему нелинейных уравнений наблюдения:

$$\begin{cases} f_{\alpha 1}^{изм} = K_{\alpha} \cdot g \cdot \sin \alpha 1 + U(0)_{\alpha} + \delta f_{\alpha 1} \\ f_{\beta 1}^{изм} = K_{\beta} \cdot g \cdot \sin(\alpha 1 + \gamma) + U(0)_{\beta} + \delta f_{\beta 1} \\ f_{\alpha}^{изм} = K_{\alpha} \cdot g \cdot \sin \alpha + U(0)_{\alpha} + \delta f_{\alpha} \\ f_{\beta}^{изм} = K_{\beta} \cdot g \cdot \sin(\alpha + \gamma) + U(0)_{\beta} + \delta f_{\beta} \end{cases}$$

или в векторно - матричном виде :

$$F(K_{\alpha}, K_{\beta}, \alpha, \alpha 1) + \Delta Y = Y 1 \tag{1}$$

где

$$F(K_{\alpha}, K_{\beta}, \alpha, \alpha 1) = \begin{bmatrix} f_{\alpha 1} \\ f_{\beta 1} \\ f_{\alpha} \\ f_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\alpha} \cdot g \cdot \sin \alpha 1 + U(0)_{\alpha} \\ K_{\beta} \cdot g \cdot \sin(\alpha 1 + \gamma) + U(0)_{\beta} \\ K_{\alpha} \cdot g \cdot \sin \alpha + U(0)_{\alpha} \\ K_{\beta} \cdot g \cdot \sin(\alpha + \gamma) + U(0)_{\beta} \end{bmatrix} -$$

измеренная частота импульсов на выходе калибруемых акселерометров «а» и «б» с учетом ориентации осей чувствительности при калибровке;

$$U(0) = \begin{bmatrix} U(0)_{\alpha} \\ U(0)_{\beta} \\ U(0)_{\alpha} \\ U(0)_{\beta} \end{bmatrix} - \text{смещение нуля акселерометров «а» и «б», которое определяется заблаговременно и учитывается в СНУН;}$$

$$\Delta Y = \begin{bmatrix} \delta f_{\alpha 1} \\ \delta f_{\beta 1} \\ \delta f_{\alpha} \\ \delta f_{\beta} \end{bmatrix} - \text{случайная ошибка определения частоты импульсов на выходе акселерометров «а» и «б» (при решении СНУН не учитывается, так как ее значение пренебрежимо мало по сравнению с результатами измерений);}$$

$$Y 1 = \begin{bmatrix} f_{\alpha 1}^{изм} \\ f_{\beta 1}^{изм} \\ f_{\alpha}^{изм} \\ f_{\beta}^{изм} \end{bmatrix} - \text{результаты определения (измерения) частоты следования импульсов на выходе калибруемых акселерометров;}$$

$g$  – заданное ускорение силы тяжести, определяется заблаговременно с высокой точностью;

$\gamma$  – постоянный в процессе калибровки угол между осями чувствительности калибруемых акселерометров (при быстродействующей калибровке не оценивается).

Вектор действительных (неизвестных) значений оцениваемых параметров акселерометров  $X 1$  в данном случае равен:

$$X 1 = [K_{\alpha} \ K_{\beta} \ \alpha \ \alpha 1]^T,$$

где  $K_{\alpha}$ ,  $K_{\beta}$  – действительные значения масштабных коэффициентов калибруемых акселерометров «а» и «б»;

$\alpha$  – действительное значение угла ориентации оси чувствительности акселерометра «а» в рабочем (боевом) положении;

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

$\alpha l$  – действительное значение угла ориентации оси чувствительности акселерометра «а» в технологическом положении.

Элементами вектора действительных значений оцениваемых параметров акселерометров являются те значения прибора, которые в наибольшей степени влияют на точность попадания боевых блоков (ББ) в цель.

Вектор расчетных значений оцениваемых параметров акселерометров  $XI^P$  равен:

$$XI^P = [K_\alpha^P K_\beta^P \alpha^P \alpha l^P]^T.$$

Необходимо определить нелинейную оптимальную оценку  $\hat{X}^{opt}$  масштабных коэффициентов и углов ориентации осей чувствительности акселерометров «а» и «б» при быстрой действующей калибровке акселерометров.

Доказано, что угол ориентации оси чувствительности акселерометра «а» в технологическом положении должен иметь оптимальное значение при комплексной калибровке. Данное положение определяется в результате решения задачи оптимизации режима измерений. Условие оптимальности режима измерений при оптимальной оценке параметров акселерометров с априорной информацией имеет вид [3,4,7,9]:

$$\min D(\alpha l)_{\Delta L}^B \quad (2)$$

$$no \alpha l \in \alpha l^{don}$$

С учетом проведения оптимизации режима измерений, вектор расчетных значений оцениваемых параметров акселерометров  $XI^P$  равен:

$$XI^P = [K_\alpha^P K_\beta^P \alpha^P \alpha l^{opt}]^T.$$

Представим систему нелинейных функций  $F(K_\alpha, K_\beta, \alpha, \alpha l)$  из (1) формулой Тейлора для функции любого числа переменных:

$$F(K_\beta, K_\alpha, \alpha, \alpha l) = F(K_\alpha^P, K_\beta^P, \alpha^P, \alpha l^P) + C \cdot X + R_1, \quad (3)$$

где  $X = XI - XI^P$  – вектор отклонений действительных (неизвестных) значений оцениваемых параметров акселерометров от их расчетных значений, значит

$$X = [\Delta K_\alpha \Delta K_\beta \Delta \alpha \Delta \alpha l]^T;$$

$C = \left[ \frac{\partial F}{\partial XI} \right]_{XI=XI^P}$  – прямоугольная матрица Якоби размером  $4 \times 4$ , которая в нашем случае имеет вид:

$$C = \begin{bmatrix} g \cdot \sin \alpha l^P & 0 & K_\alpha^P \cdot g \cdot \cos \alpha l^P & 0 \\ 0 & g \cdot \sin(\alpha l^P + \gamma) & K_\beta^P \cdot g \cdot \cos(\alpha l^P + \gamma) & 0 \\ g \cdot \sin \alpha^P & 0 & 0 & K_\alpha^P \cdot g \cdot \cos \alpha^P \\ 0 & g \cdot \sin(\alpha^P + \gamma) & 0 & K_\beta^P \cdot g \cdot \cos(\alpha^P + \gamma) \end{bmatrix};$$

$R_1$  – остаточный член формулы Тейлора в форме Лагранжа.

Подставив (3) в (1) и проведя необходимые преобразования [3,5,6], получим линейную систему уравнений наблюдения (4), оптимальным

решением которой является линейная оптимальная оценка с априорной информацией  $\hat{X}_B$ , которая дает систему нелинейных алгебраических уравнений (СНАУ) вида (6).

$$C(XI^P) \cdot X + \Delta Y = YI^{изм} - F(XI^P) - R_1, \quad (4)$$

Из выражения (4) получаем:

$$\hat{X}_B = C_B^{-1}(XI^P) \cdot [YI^{изм} - F(XI^P) - R_1] + \Delta X_{анп}, \quad (5)$$

где

$$C_B^{-1}(XI^P) = [K_X^{-1} + C^T(XI^P) \cdot K_{\Delta Y}^{-1} \cdot C(XI^P)]^{-1} \cdot C^T(XI^P) \cdot K_{\Delta Y}^{-1} - (6)$$

обобщенная обратная матрица в которой существуют указанные выше матрицы.

Таким образом, выражение (5) является эквивалентной СНАУ. Результатом решения данной системы является нелинейная оптимальная оценка искомых (определяемых) параметров акселерометров (масштабных коэффициентов и углов выставки осей чувствительности).

Так как эквивалентная СНАУ (5) записана в векторно-матричной форме, то для ее решения целесообразно применить численный метод, исключив из итерационного процесса остаточный член  $R_1$ , поскольку он неизвестен и близок к нулю. Сущность данного метода заключается в организации итерационного процесса вида [3,8,9]:

$$XI^{(K+1)} = XI^{(K)} + X^{(K)}(XI^{(K)}) + \Delta X^{(K)}(XI^{(K)})_{анп}, \quad (7)$$

где  $K=0,1,2,3,\dots$  – номер приближения или итерации;

$XI^{(K+1)}$  – первое приближение оцениваемых параметров;

$XI^{(K)}$  – заданное начальное приближение оцениваемых параметров;

$X^{(K)}(XI^{(K)})$  – начальная оптимальная оценка отклонения действительного значения искомых параметров  $XI$  от заданного их значения  $XI^P$ ;

$$\Delta X^{(K)}(XI^{(K)})_{анп} = [K_X^{-1} + C^T(XI^{(0)}) \cdot K_{\Delta Y}^{-1} \cdot C(XI^{(0)})]^{-1} \cdot K_X^{-1} \cdot m_X -$$

поправка к линейной оптимальной оценке параметров с априорной информацией за счет заданной априорной информации, которая соответствует начальному приближению оцениваемых параметров  $XI^{(0)}$ .

Для начала итерационного процесса (7) необходимо задать вектор начального приближения –  $\hat{X}_B^{(0)}$ . Наиболее целесообразно в качестве начального приближения использовать линейную оптимальную оценку, определяемую по формуле [3,9]:

$$\hat{X}_B^{(0)} = C_B^{-1} \cdot Y + \Delta \hat{X}_{анп}. \quad (8)$$

Точность итерационного процесса (7) определяется условием:

$$\|\hat{X}_B^{(K+1)} - \hat{X}_B^{(K)}\| \leq \varepsilon. \quad (9)$$

где  $\varepsilon$  – точность определения нелинейной оптимальной оценки параметров акселерометров

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

при их быстродействующей калибровке, которая устанавливается исследователем. Целесообразно устанавливать  $\varepsilon$  сравнимую с погрешностью определения ускорения силы тяжести в современных межконтинентальных баллистических ракетах.

Остановку итерационного процесса (7) необходимо проводить при выполнении условия [3]:

$$L \cdot \left\| \hat{X}_E^{(K+1)} - \hat{X}_E^{(K)} \right\| \leq \Delta L^{зад}, \quad (10)$$

где  $L \cdot \left\| \hat{X}^{(K+1)} - \hat{X}^{(K)} \right\|$  - значение ошибки промаха по дальности, которая зависит от ошибки оценки параметров акселерометров;

$\Delta L^{зад}$  - заданное значение ошибки промаха по дальности, которое устанавливается исследователем при проведении испытаний (опыта).

При выполнении условия (10) нелинейная оптимальная оценка параметров акселерометров равна последнему приближению вектора оцениваемых параметров:

$$\hat{X}_B^{opt} = \hat{X}_B^{(K+1)}. \quad (11)$$

Показанные выше формулы необходимо использовать при нахождении оценки параметров акселерометров с априорной информацией об оцениваемых параметрах (Байесовская оценка). При отсутствии априорной информации есть возможность провести оценку параметров акселерометров по методу наименьших квадратов.

Таким образом, используя данный способ калибровки акселерометров появляется возможность сократить общее время на подготовку к боевому применению современных межконтинентальных баллистических ракет.

### Литература

1. Аксёнов В.Е. Эксплуатационная калибровка КИП автономных систем управления ракет: монография в 3-х частях. Ч.1 / В.Е. Аксёнов. Серпухов: ВА РВСН им. Петра Великого (филиал в г. Серпухов), 2014. 383 с.
2. Аксёнов В.Е. Эксплуатационная калибровка

КИП автономных систем управления ракет: монография в 3-х частях. Ч.2 / В.Е. Аксёнов, Л.М.Жебрак. Серпухов: ВА РВСН им. Петра Великого (филиал в г. Серпухов), 2014. 334 с.

3. Аксёнов В.Е. Эксплуатационная калибровка КИП автономных систем управления ракет: монография в 3-х частях. Ч.3 / В.Е. Аксёнов, Е.В. Пискулин. Серпухов: ВА РВСН им. Петра Великого (филиал в г. Серпухов), 2014. 180 с.

4. Аксёнов В.Е. Нелинейная оптимальная оценка параметров с подвижной точкой разложения без априорной информации о параметрах // Известия Института инженерной физики, 2011. №.4(22). С.14-20.

5. Аксёнов В.Е. Нелинейная оптимальная оценка параметров с подвижной точкой разложения и с априорной информацией о параметрах // Известия Института инженерной физики, 2012. №.3(25). С.54-62.

6. Аксёнов В.Е. Математическая модель комплексной предстартовой калибровки акселерометров с нелинейной оптимальной оценкой их параметров при подвижной точке разложения и без априорной информации // Известия Института инженерной физики, 2015. №.3(37). С.44-49.

7. Аксёнов В.Е., Порядин А.Ю. Математическая модель комплексной предстартовой калибровки акселерометров с нелинейной оптимальной оценкой их параметров при подвижной точке разложения с априорной информацией // Известия Института инженерной физики, 2016. №.3(40). С.30-34.

8. Пирумов У.Г. Численные методы: учебник и практикум для академического бакалавриата. М.: Издательство Юрайт, 2014. 421с.

9. Порядин А.Ю. Методика комплексной предстартовой калибровки акселерометров с нелинейной оптимальной оценкой их параметров при подвижной точке разложения в двух положениях гиросtabilизированной платформы с априорной информацией // Известия Института инженерной физики, 2016. №.2(40). С.35-39.



# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.311

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ КОМБИНИРОВАННОГО ТИПА

## MATHEMATICAL MODEL OF DIESEL- GENERATOR SET OF COMBINED TYPE

**Андрей Григорьевич Непейчиев**

адъюнкт  
филиал ВА РВСН им. Петра  
Великого (г. Серпухов)  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, ул. Бригадная, д.17  
Тел.: +7(964)520-95-47  
E-mail: nepeychiev@mail.ru

### Аннотация

Предложена математическая модель дизель-генераторной установки комбинированного типа с переменной скоростью вращения на базе синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов и статического преобразователя, для исследования характеристик дизель-генераторных установок в различных режимах работы и отличающаяся от известных учетом переменной скорости вращения вала, магнитного потока от постоянных магнитов и обмотки дополнительного возбуждения, а так же учитывающая влияние накопителя энергии.

**Ключевые слова:** математическая модель, дизель-генераторная установка с переменной скоростью вращения вала, дизель-генераторная установка комбинированного типа, синхронный генератор с возбуждением от постоянных магнитов, статические преобразователи в дизель-генераторных установках.

### Summary

A mathematical model of a combined-type diesel-generator set with a variable rotational speed on the basis of a synchronous generator with excitation from permanent magnets and a static converter is proposed, to study the characteristics of diesel-generator sets in various operating modes and differing from those known for varying the rotational speed of the shaft, the magnetic flux from permanent magnets and windings of additional excitation, as well as taking into account the influence of the energy store.

**Keywords:** mathematical model, diesel generator set with variable shaft rotation speed, diesel-generator set of combined type, synchronous generator with excitation from permanent magnets, static converters in diesel-generator sets.

Одной из перспективных задач, согласно указу Президента РФ №642 от 1 декабря 2016г., является развитие ресурсосберегающих технологий и повышение эффективности переработки углеводородного сырья. Следовательно, совершенствование электроэнергетических систем работающих на углеводородном сырье, является частью этой задачи. Ядром большинства систем автономного электроснабжения (более 90%) служат дизель-генераторные установки (ДГУ). Развивающимся направлением совершенствования ДГУ является перевод приводного дви-

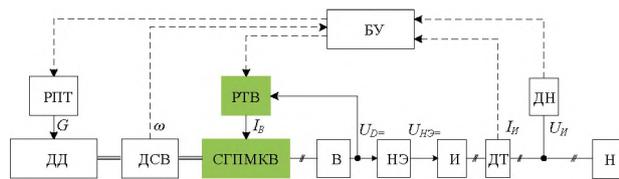
гателя на переменную скорость вращения, что требует проведения дополнительных научных исследований.

В качестве основного инструмента исследования подобных энергетических систем удобно использовать методы математического моделирования, в результате чего возникает задача создания математической модели (ММ) ДГУ с переменной скоростью вращения, адекватно отражающей поведение объектов энергетической системы как в статических, так и динамических режимах работы.

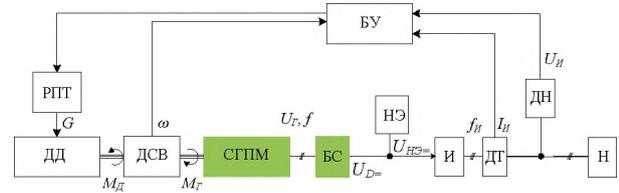
# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Основной проблемой, с которой сталкиваются разработчики при создании ММ ДГУ, является ограниченный объем информации, которую предоставляют производители ДГУ и отдельных ее элементов. В работе представлена математическая модель ДГУ, учитывающая переменную скорость вращения и переменный магнитный поток, влияние накопителя энергии на отклонение напряжения, показан пример моделирования 50 кВт дизель-электрического агрегата при переменной скорости вращения.

В качестве объекта моделирования выступают схемы разработанных и описанных [2] ДГУ комбинированного типа с переменной скоростью вращения (рисунки 1, 2). Исходными данными для моделирования 50 кВт ДГУ являются: технические характеристики дизельного двигателя Д246-4М, генератора 1-ГС-60, а также усредненные значения требуемых характеристик модульных систем выпрямителей, инверторов и накопителей энергии.



**Рис. 1.** Функциональная схема автономного источника питания с переменной скоростью вращения вала и синхронном генераторе комбинированного возбуждения: ДД – дизельный двигатель, ДСВ – датчик скорости вращения, СППМКВ – синхронный генератор на постоянных магнитах комбинированного возбуждения, В – выпрямитель, НЭ – накопитель энергии, И – инвертор, ДТ – датчик тока, ДН – датчик напряжения, Н – электрическая нагрузка, РПТ – регулятор подачи топлива, РТВ – регулятор тока возбуждения, БУ – блок управления.



**Рис. 2.** Функциональная схема АИП с переменной скоростью вращения вала, СГ на постоянных магнитах и управляемом выпрямителе: ДД – дизельный двигатель, ДСВ – датчик скорости вращения, СППМ – синхронный генератор на постоянных магнитах, БС – блок стабилизации, НЭ – накопитель энергии, И – инвертор, ДТ – датчик тока, ДН – датчик напряжения, Н – электрическая нагрузка, РПТ – регулятор подачи топлива, БУ – блок управления.

Используя метод блочно-функционального моделирования [4], заключающийся в разбиении объекта моделирования на функциональные блоки, последовательно математически описаны функциональные блоки элементов объ-

екта моделирования, руководствуясь тем, что скорость вращения вала ДГУ  $\omega$ , есть функция от электрической нагрузки и удельного расхода топлива  $\omega = f(P_{гр} g_e)$ .

Для функциональных схем (рисунки 1, 2) справедливо уравнение динамики механических частей ДГУ:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{д} - M_{г} - M_{п} \quad (1)$$

где  $J$  – момент инерции вращающихся масс ДГУ;  $\omega$  – угловая скорость вращения;

$M_{д} = f(G, N_e, \omega)$  – механический момент на валу двигателя;

$M_{г} = f(P_{гр} \omega)$  – электромагнитный момент генератора;

$M_{п}$  – момент потерь.

Так как вал ДД жестко связан с ротором генератора, угловая скорость вращения вала двигателя  $\omega_д$  равна угловой скорости вращения ротора синхронного генератора  $\omega_г$ , то из выражения для моментов двигателя и генератора:

$$M_{г} = P_{гр} / \omega_г = N_e / \omega_д = M_{д},$$

следует, при изменении потребляемой активной мощности генератора  $P_{гр}$ , необходимо изменять либо эффективную мощность двигателя  $N_e$ , либо изменится скорость его вращения  $\omega_д$ .

Эффективная мощность  $N_e$  связана с эффективным удельным расходом топлива  $g_e$ , через часовой расход топлива  $G$ :  $g_e = G / N_e$  [1]. Угловая скорость вращения двигателя  $\omega_{мр}$  (об/мин), для каждого значения эффективной мощности определяется из выражения выведенного для  $N_e = f(p_e = f(g_e))$  при номинальных значениях, как:

$$\omega_{мр} = \frac{30 \cdot \tau_{де} \cdot (P_{г} + \Delta P_{п})}{p_e \cdot V_{л}} \quad (2)$$

где  $P_{г} + \Delta P_{п} = N_e$ ,  $\Delta P_{п} \approx 0.1 N_e$  – мощность потерь, определяемая как мощность потерь холостого хода;

$\tau_{де}$  – тактность двигателя;

$V_{л}$  – объем рабочих цилиндров;

$p_e = 3600 p_i / g_e H_u \eta_i$  – среднее эффективное давление при номинальном удельном расходе топлива;

$p_i$  – среднее индикаторное давление;

$H_u$  – низшая теплота сгорания топлива;

$\eta_i$  – индикаторный КПД.

Пренебрегая потерями в обмотке якоря, можем приравнять активную мощность генератора  $P_{г}$  и электромагнитную мощность  $P_{эм}$ , тогда:

$$P_{г} = P_{эм} = m \cdot U_{г} \cdot I_{\phi} \cdot \cos \varphi \quad (3)$$

где  $m$  – число фаз генератора;

$U_{г}$  и  $I_{\phi}$  – действующее напряжение и ток одной фазы;

$\cos \varphi$  – коэффициент мощности, определяемый характером нагрузки [5].

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Модель синхронной машины с постоянными магнитами, для определения потребляемой мощности, можно получить из обобщенной модели электрической машины, путем сокращения выражений для демпферной обмотки и обмотки возбуждения, приняв ток возбуждения константой, а так же применения закона электромагнитной индукции данной Максвеллом [5]

$$e = -\omega d\Phi/dt,$$

где  $\omega$  – число витков пронизывающихся одним и тем же магнитным потоком  $\Phi$ , отсюда:

$$\begin{cases} u_d = L_{\sigma d} \frac{d}{dt} i_d + M_{ad} \frac{d}{dt} i_a - L_q i_q \omega_p + r_a i_d; \\ u_q = L_{\sigma q} \frac{d}{dt} i_q + M_{aq} \frac{d}{dt} i_a + L_d i_d \omega_p + r_a i_q - \omega \frac{d}{dt} \Phi. \end{cases} \quad (4)$$

где  $u_d$  и  $u_q$  – напряжения генератора разложенное по продольной и поперечной осям;

$i_d$  и  $i_q$  – токи в обмотках якоря по продольной и поперечной осям;

$M_{ad}$ ,  $M_{aq}$  – взаимные индуктивности между обмотками по продольной и поперечной оси;

$r_a$  – активное сопротивление обмотки якоря;

$L_d$ ,  $L_q$  – индуктивности обмоток якоря по продольной и поперечной осям машины;

$L_{\sigma d}$ ,  $L_{\sigma q}$  – индуктивности рассеяния обмотки якоря по продольной и поперечной осям машины и индуктивность рассеяния возбуждения.

Так как форма кривой поля обычно близка к синусоидальной, то поток основной волны будет приблизительно равен действительному потоку, который для постоянных магнитов определяется

$$\Phi_{\text{ПМ}} = \tau l_{\text{ПМ}} B_{\text{ПМ}},$$

а с обмоткой дополнительного возбуждения

$$\Phi_{\text{ОДВ}} = \tau l_{\text{ОДВ}} B_{\text{ОДВ}},$$

где  $B_{\text{ПМ}}$  – максимум действительной индукции постоянного магнита в воздушном зазоре;

$B_{\text{ОДВ}}$  – максимум действительной индукции от обмоток дополнительного возбуждения в воздушном зазоре;

$l_{\text{ОДВ}}$ ,  $l_{\text{ПМ}}$  – длины активных частей обмотки дополнительного возбуждения и постоянных магнитов;

$\tau$  – ширина полюсного деления.

Сопоставив выражение (4) со схемой замещения фазы генератора (рисунком 3), преобразуем его в комплексный вид удобный для проведения исследований:

$$\dot{E}_0 = \dot{I}_\phi Z_\text{я} + \dot{U}_\Gamma \quad (5)$$

где  $\dot{E}_0$ ,  $\dot{I}_\phi$ ,  $\dot{U}_\Gamma$  – комплексные ЭДС, ток, напряжение фазы генератора;

$Z_\text{я}$  – комплексное сопротивление якоря.

При этом  $Z_\text{я}$  приводится заводом изготовителем как синхронное индуктивное сопротивление по продольной  $x_d$  и поперечной  $x_q$  осям, в значе-

ние которых учтено как индуктивное реактивное сопротивление статора, так и индуктивное сопротивление потока рассеяния статора, которое для ненасыщенной машины при постоянной скорости вращения величина постоянная.

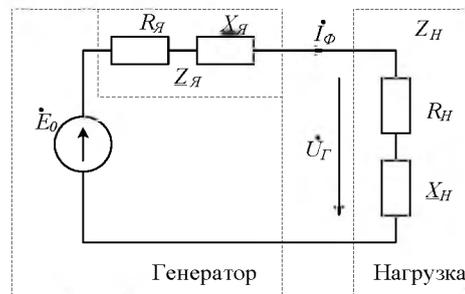


Рис. 3. Схема замещения фазы синхронного генератора

Амплитудное значение ЭДС генератора определяется по известной формуле:

$$E_{\text{эм}} = \frac{4.44 K_{\text{обм}} \omega p n (\Phi_{\text{ПМ}} \pm \Phi_{\text{ОДВ}})}{60} \quad (6)$$

где  $K_{\text{обм}}$  – обмоточный коэффициент определяемый конструкцией машины;

$\omega$  – число витков фазы якоря;

$p$  – число пар полюсов;

$n$  – скорость вращения в об/мин [5].

В выражении (5) неизвестными остаются  $\dot{I}_\phi$ ,  $\dot{U}_\Gamma$ , которые определяются если задаться значением комплексного сопротивления нагрузки  $Z_\text{Н}$ .

Напряжение на входе выпрямителя, определяется напряжением на выходе генератора. Для схем неуправляемых выпрямителей, известно [1] выражение, позволяющее получить значение выходного напряжения  $U_d$ , по зависимости:

$$U_d = \frac{m}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{m}}^{\frac{\pi}{m}} U_{\Gamma m} \cos \alpha t d\alpha t = U_{\Gamma m} \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{m}}{\frac{\pi}{m}} = \sqrt{2} U_\Gamma \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{m}}{\frac{\pi}{m}} \quad (7)$$

где  $m$  – число фаз;

$U_{\Gamma m}$  – амплитудное значение первой гармоники входного напряжения.

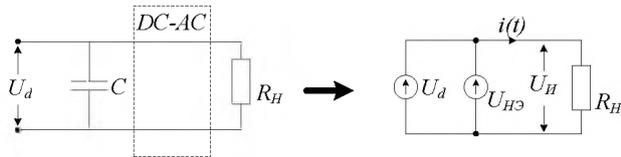
Для схемы с блоком стабилизации на управляемом выпрямителе, выходное напряжение будет определяться продолжительностью работы вентиля в включенном состоянии, т.е. величина среднего значения напряжения изменится пропорционально площади передаваемого в нагрузку напряжения и для схемы на рисунке 2 определяется [1]:

$$U_d = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3} + \alpha}^{\frac{2\pi}{3} + \alpha} U_{\Gamma m} \sin \alpha t d\alpha t \quad (8)$$

где  $\alpha$  – угол управления, который задается схемой управления блока стабилизации.

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Влияние накопителя энергии можно учесть, если использовать известные выражения, вытекающие из классического метода расчета переходных процессов. Суть метода сводится к анализу и решению линейных однородных и не однородных дифференциальных уравнений, которые получаются при описании схемы (рисунк 4) в до коммутационный период и после него.



**Рис. 4.** Схема замещения для учета работы накопителя

Напряжение на накопителе энергии  $U_{HЭ}$  (оно же напряжение на входе инвертора) будет пропорционально действующим значениям напряжения в момент до изменения мощности нагрузки и после него, т.е.

$$U'_{HЭ}(t) = (U_{HЭ} - U'_d) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_c}} + U'_d \quad (9)$$

где  $U'_{HЭ}$  – действующее значение напряжения на накопителе энергии после изменения нагрузки;

$U_{HЭ}$  – значение напряжения на накопителе энергии до изменения нагрузки;

$U'_d$  – напряжение на выходе выпрямителя;

$\tau_c = R_H C$  – постоянная времени цепи;

$R_H$  – активное сопротивление нагрузки,

$C$  – емкость накопителя энергии.

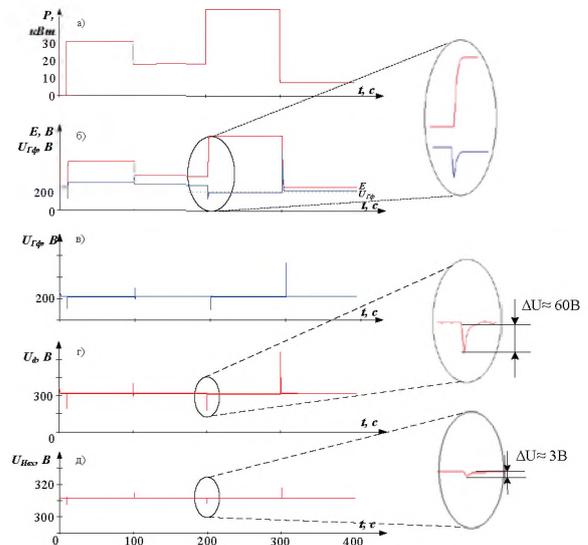
Амплитудное значение напряжения  $U_{Hm}$ , его частота  $f$  и форма в инверторах напряжения определяется законами коммутации силовой части инвертора и не зависят от величины электрической нагрузки  $Z_{LH}$  [1], следовательно, оперируя действующими значениями инвертор можно рассматривать как условие, в котором

$$U_{Hm} \leq U_{HЭ}$$

Объединив выражения 1-9 в систему получаем математическую модель объекта моделирования, где  $\omega_{mp} = f(P_{HЭ} g_e)$ .

Моделирование проводилось в среде Mathcad, с целью исследования выходных характеристик ДГУ при переменной частоте вращения и изменении потребляемой мощности от минимального до номинального значения. Характерным режимом работы ДГУ является ступенчатый режим изменения мощности нагрузки. Эти процессы обуславливают переходные процессы в системе «ДД-СГ-В-НЭ-И-Н». В качестве примера на рисунке 5 приведены результаты моделирования, когда в начальный момент времени мощность нагрузки минимальная, а затем при  $t_1=10c$  происходит наброс нагрузки до 30 кВт,

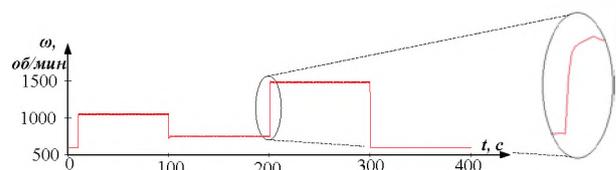
при  $t_2=100c$  сброс до 20 кВт, при  $t_3=200c$  наброс до 50 кВт и при  $t_3=100c$  сброс до 8,5 кВт.



**Рис. 5.** Графики изменения мощности и напряжения при регулировании управляемым выпрямителем или обмотками дополнительного возбуждения: а) изменения мощности; б) изменение ЭДС и выходного напряжения генератора; в) изменение напряжения генератора при регулировании ОДВ; г) изменение напряжения при регулировании БС; д) изменение напряжения на входе инвертора.

Из графиков видно, что переходные процессы имеют место, однако при использовании накопителя достаточной емкости на входе инвертора они практически отсутствуют. Это означает и лучшее качество напряжения при условии исправности самого инвертора. Длительность переходных процессов определяется инерционностью самого двигателя, быстродействием выпрямителя или регулятора тока возбуждения, а так же емкостью накопителя.

Изменение скорости вращения вала приводного двигателя (рисунк 6) рассчитывается по зависимости (2) пропорционально изменению мощности нагрузки.



**Рис. 6.** График изменения скорости вращения вала двигателя

Общую эффективность рассматриваемых систем в сравнении с ДГУ без регулирования скорости вращения можно оценить по изменению КПД и удельного расхода топлива (рисунк 7).

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

КПД рассматриваемых ДГУ с использованием статических преобразователей ниже в диапазоне от 45 до 50 кВт. Разница удельных расходов топлива увеличивается с понижением мощности нагрузки, а удельный расход топлива при изменении потребляемой мощности в рабочем диапазоне возможно поддерживать в рамках номинального до мощности 18 кВт. Расход топлива при работе в среднем на активную мощность 25 кВт снижается на 9,2%, что существенно повышает технико-экономические показатели ДГУ и увеличивает его ресурс. Показатели качества электроэнергии определяются возможностями инвертора, что позволяет обеспечить их превосходство.

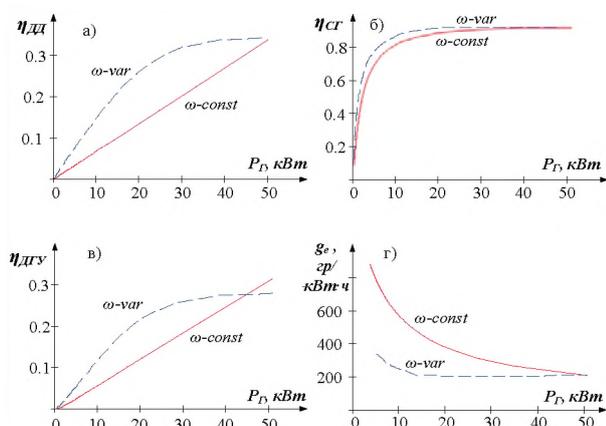


Рис. 7. Зависимость КПД и удельного расхода топлива от мощности нагрузки

Разработанная математическая модель в аналитическом виде, позволяет исследовать возможные режимы работы ДГУ комбинированного типа, что дает возможность выстроить наиболее эффективный алгоритм управления, с целью получения лучших технико-экономических показателей без потери показателей качества электроэнергии. Моделирование 50 кВт ДГУ демонстрирует эффективность применения ДГУ с переменной скоростью вращения при использовании в комбинации со статическими преобразователями и накопителями энергии в сравнении с ДГУ постоянной скорости вращения.

### Литература

1. Крылов С.К., Сучков В.П. Основы преобразовательной техники систем электроснабжения ракетных комплексов: Учебное пособие. М.: ВА РВСН имени Петра Великого, 2010. 311 с.
2. Непейшиев А.Г. Автономная генераторная установка / А.Г. Непейшиев, А.В. Лучин, Б.А. Усик/ Патент №172810 от 03.04.2017г.
3. Колчин А.И., Демидов В.П. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: Учебное пособие для вузов; изд. 3-е. М.: Высшая школа, 2001. 400 с.
4. Аристов А.В., Бурулько Л.К., Паюк Л.А. Математическое моделирование в электромеханике: Учебное пособие. Томск: Издательско-полиграфическая фирма ТПУ, 2005. 155 с.
5. Лесков Б.М. Электрические машины: Учебник для слушателей академии. Ленинград: Типография ЛВИКА им. Можайского, 1969. 459 с.

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 543.21.543.062

## РАЗРАБОТКА ЭКСПРЕССНОГО СПОСОБА МИКРОГРАВИМЕТРИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАКТИЧЕСКИХ СМОЛ В БЕНЗИНАХ\*

## DEVELOPMENT OF EXPRESS METHOD OF MICROGRAVIMETRIC DETERMINATION OF ACTUAL RESINS IN PETROLS

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

**Ирина Александровна Грибоедова**  
студентка  
ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный  
университет инженерных технологий»  
Адрес: 394036, г. Воронеж,  
проспект Революции, д. 19  
Тел.: +7(930)407-97-16  
E-mail: i.griboedowa@yandex.ru

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

### Аннотация

В статье показана возможность применения метода пьезокварцевого микровзвешивания для экспрессной, простой оценки концентрации фактических смол в бензинах. Подтверждена статистическая надежность результатов нового метода и стандартных показателей качества бензинов с применением непараметрического метода для малых выборок ранговой корреляцией Спирмена.

**Ключевые слова:** качество топлив, бензины, концентрация фактических смол, экспрессный способ, пьезокварцевое микровзвешивание, пьезорезонаторы.

### Summary

The article shows the possibility of using the method of piezoquartz micro weighting for rapid, simple assessment of the concentration of actual resins in gasoline. The statistical reliability of the results of the new method and standard indicators of gasoline quality with the use of nonparametric method for small samples with the Spearman rank correlation was used.

**Keywords:** quality of fuels, gasolines, concentration of actual pitches, express method, piezoquartz microweighting, piezoresoles

### Введение

Для оценки способности бензинов образовывать низкотемпературные отложения (эффективность применения топлив на технике) и стабильности свойств (окисляемость) контроли-

руют показатель «концентрация фактических смол» (мг/100 см<sup>3</sup>). Этот показатель входит в перечень полного анализа бензинов и дизельных топлив, оценивает их эксплуатационные свойства [1].

\* Результаты получены при выполнении НИР в рамках гранта по программе «У.М.Н.И.К.» №11438ГУ/2017, в рамках договора о научно-техническом сотрудничестве Филиала ВА РВСН имени Петра Великого с ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» № 2/09-16/ДОНТС/176.

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Кроме того, чем ниже химическая стабильность бензина, тем больше показатель концентрации фактических смол и ниже допустимые сроки хранения бензинов в различных условиях [2].

В соответствии с требованиями ГОСТ этот показатель определяется двумя методами: выпаривания струей [3] и паровым методом Бударова [4].

Сущность обоих методов заключается в выпаривании точного объема топлива с последующим определением массы остатка, состоящего из фактических смол и других нелетучих соединений в условиях потока воздуха [3] и под струей водяного пара [4].

Стандартные методики требуют применения сложного аппаратного оформления, высоких энергетических затрат и выполняются только в специализированных лабораториях.

Альтернативным способом определения фактических смол в бензинах является фракционная перегонка. Подход заключается в поэтапном нагревании пробы бензина до температуры полного испарения жидкой фазы и отгонки фракций до неиспаряемого остатка, по массе которого определяется концентрация фактических смол. Недостаток такого способа заключается в его длительности (не менее 2 часов). Кроме того, все перечисленные методы и решения позволяют определить условные показатели состава топлива, определяемые условиями эксперимента.

Перспективным направлением определения содержания фактических смол в бензинах является применение пьезокварцевых резонаторов, генерирующих объемные акустические волны. Они, благодаря высокой чувствительности по массе, широко применяются как чувствительные микровесы, которые могут контактировать как с газовыми, так и жидкими средами. Основным уравнением, который описывает преобразования изменений массы, присоединенной к поверхности кварцевого пьезорезонатора, вращение выходной частоты автогенератора (отклик), является уравнение модели Зауэрбрея [5]:

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

где  $\Delta F$  – изменение резонансной частоты, Гц;  
 $\Delta m$  – изменение массы на электродах резонатора, мкг;  
 $k$  – константа, которая объединяет характеристики кварца, электродов, условий микровзвешивания.

Достоинства предложенного решения заключаются в применении малых объемов проб – не более 1-5 мкл, в низкой коррозионной активности материалов электродов (серебро, золото, алюминий), которые являются наиболее чувствительной областью резонаторов, что позволяет неограниченно применять недорогие ком-

плекующие до их физического выхода из строя.

Цель исследования – оценить возможность разработки экспрессного способа измерения содержания фактических смол в бензинах, значительно снижающий время и себестоимость анализа по сравнению с существующими решениями.

## Материал и методы исследования

В качестве объектов исследования выбраны пробы бензина с октановым числом 92 (А-92) различных производителей и дат розлива (таблица 1).

Для всех проб измерены отдельные стандартные показатели, связанные с содержанием компонентов нефтяных фракций: качественные характеристики (цвет, наличие воды, механические примеси, водорастворимые кислоты и щелочи), плотность ( $\rho$ , г/см<sup>3</sup>) по API Р 50.2.075-2010 ГСИ, масса нелетучего остатка ( $V_{ост}$ , см<sup>3</sup>) фракционной перегонкой по ГОСТ 2177-99 (ИСО 3405-88) (таблица 1), дана органолептическая оценка.

В качестве чувствительных микровесов применяли пьезорезонаторы ОАВ-типа с базовой частотой 10,0 МГц на длинных ножках и серебряными электродами диаметром 5 мм (рисунком 1).

Для предотвращения растекания неводных проб за границы тензочувствительной области (наибольшая чувствительность по массе), вследствие малого поверхностного натяжения и высокой смачиваемости поверхности, формировали на кварцевой пластине контур вокруг электрода, не захватывая его, толщиной 1-2 мм (рисунком 2). Для этого с помощью капилляра диаметром 1 мм наносили окружность из поливинилацетатного клея. Сушили при температуре 95-100 °С в течение 20 мин.

Таблица 1

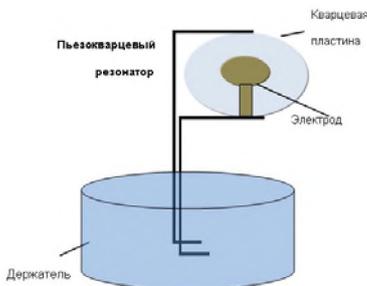
Объекты исследования и их некоторые стандартные физико-химические показатели

Пробы	Точки отбора проб	Цвет	$\rho$ , г/см <sup>3</sup> (T=20 °C)	$V_{ост}$ , см <sup>3</sup>	Соответствие НД
1	Пользователь 1	Светло-желтый	0.736	4.3	Соответствует НД
2	Подсолнух		0.727	4.3	
3	Пользователь 2		0.728	2.2	
4	ТНК АЗС ЗО Усмань		0.736	4.3	
5	ЛТК Lipetsk Fuel Company		0.732	4.3	
6	Дашковка		0.738	3.4	
7	АЗС №20, Бобренок		0.734	2.6	
8	Татнефть, Серпухов		0.753	3.0	
9	«Газпромнефть», Серпухов		0.730	8.0	

В качестве частотомера использовали одноканальный газоанализатор «САГО». Измеряли

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

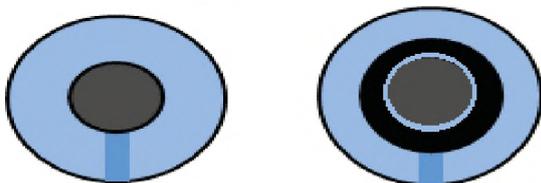
частоту пьезорезонатора до и после нагрузки пробой на одноканальном частотомере. Пробу наносили на один электрод пьезорезонатора (одноосная, односторонняя нагрузка).



**Рис. 1.** Пьезокварцевый резонатор

Подготовка бензина заключалась в отборе средней пробы образца и при необходимости в фильтровании. Фиксировали исходную частоту колебаний резонатора  $F_0$  (МГц) с ограничивающим контуром и закрепляли в переносной держатель.

На верхний электрод, внутрь контура, нанесли микрошприцем некоторый объем анализируемой пробы бензина и высушивали каплю пробы в сушильном шкафу в течение 10 мин при температуре  $95 \pm 2$  оС.



**Рис. 2.** Схема формирования контура вокруг электрода пьезорезонатора

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

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

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

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

Содержание фактических смол в бензине  $m_{\text{пьезо}}$  (мкг) рассчитывали по уравнению Зауэрбрера [5]:

$$m_{\text{пьезо}} = \frac{\Delta F \cdot S}{2,27 \cdot F_0^2},$$

где  $S$  – площадь электродов резонатора, см<sup>2</sup> – как правило 0,2 см<sup>2</sup>.

После каждого анализа проводили удаление нелетучего остатка спиртом или толуолом, далее просушивали резонатор.

Правильность результатов микровзвешивания оценивали по результатам, полученным фракционной перегонкой топлив по ГОСТ 2177-99 (ИСО 3405-88).

Для установления различий компонентов нефтяных фракций проб бензина А-92 использовали молекулярную абсорбционную спектроскопию в средней УФ области относительно гексана [6] на спектрофотометре SHIMADZU UV mini 1240.

Для нахождения и оценки тесноты связи между результатами различных методов использовали непараметрический метод для малых выборок ранговой корреляцией Спирмена. Ранжировали каждый из элементов признаков ( $X$  и  $Y$ ) в порядке возрастания значений. Если при ранжировании были обнаружены повторяющиеся значения среди элементов признаков  $X$  и  $Y$ , то ранг повторяющихся значений признаков был рассчитан как среднее арифметическое из их рангов. Для каждого элемента из наборов признаков  $X$  и  $Y$  рассчитывали  $D_i$  – разность рангов,  $D^2$  – квадрат разности рангов пары соответствующих элементов  $X$  и  $Y$  и поправки на одинаковые ранги  $A_x$  и  $B_y$  в наборах признаков  $X$  и  $Y$  соответственно по формулам:

$$A_x = \frac{n^3 - n}{12};$$

$$B_y = \frac{k^3 - k}{12},$$

где  $n$  – количество одинаковых рангов в наборе признаков  $X$ ;

$k$  – количество одинаковых рангов в наборе признаков  $Y$ .

Рассчитывали коэффициент корреляции Спирмена ( $r_{\text{набл}}$ ) по формуле [7]:

$$r_{\text{набл}} = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^m D_i^2 - A_x - B_y}{\sqrt{(m^3 - m - 12 \cdot A_x) \cdot (m^3 - m - 12 \cdot B_y)}}$$

где  $m$  – ранг самого большого элемента последовательности.

Для оценки полученного значения коэффициента Спирмена ( $r_{\text{набл}}$ ), сравнивали его с соответствующим критическим значением для заданного уровня значимости из таблицы критических значений коэффициента ранговой корреляции Спирмена ( $r_{\text{крит}}$ ). Если  $r_{\text{набл}} > r_{\text{крит}}$ , то зависимость признаков статистически значима, и наоборот, если  $r_{\text{набл}} < r_{\text{крит}}$ , то зависимость признаков является статистически не значимой [8].

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

## Полученные результаты и их обсуждение

Предварительно определены стандартные показатели качества и свойства для проб бензина А-92, связанные с содержанием компонентов нефтяных фракций и других нелетучих соединений (таблица 1). Показатели всех проб, за исключением пробы 9, соответствуют нормативным требованиям. Для пробы 9 установлено превышающее норму содержание фактических смол.

Пьезокварцевым микровзвешиванием проанализированы пробы бензинов А-92 (таблица 2). По коэффициенту вариации ( $V$ ) установлено, что полученные результаты однородны, нет грубых промахов, что характеризует стабильность способа. Большая погрешность определения нелетучего остатка определяется ошибкой на стадии нанесения пробы, не весь объем пробы, который отбирается хроматографическим шприцом, наносится на электрод, вследствие способности жидкости подниматься вверх из-за капиллярного явления.

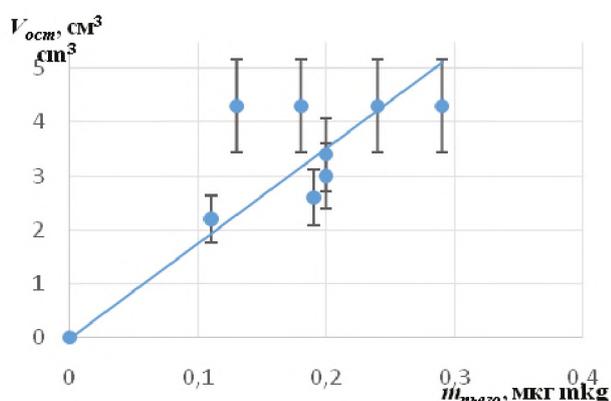
**Таблица 2**

Результаты пьезокварцевого микровзвешивания нелетучих соединений в топливах ( $m_{\text{пвезо}}$ , мкг) ( $n = 3, P = 0.95$ )

№ пробы	$m_{\text{пвезо}}$ , мкг	$V$	$\Delta$ , %
9	$0.10 \pm 0.03$	0.10	30
3	$0.11 \pm 0.02$	0.09	18
4	$0.13 \pm 0.04$	0.15	30
2	$0.18 \pm 0.08$	0.17	44
7	$0.19 \pm 0.07$	0.16	36
6	$0.20 \pm 0.05$	0.10	25
8	$0.20 \pm 0.09$	0.20	45
1	$0.24 \pm 0.11$	0.21	45
5	$0.29 \pm 0.14$	0.17	48

Для проверки правильности полученных результатов, оценена корреляция их с результатами, полученными методом отгонки (рисунк 3).

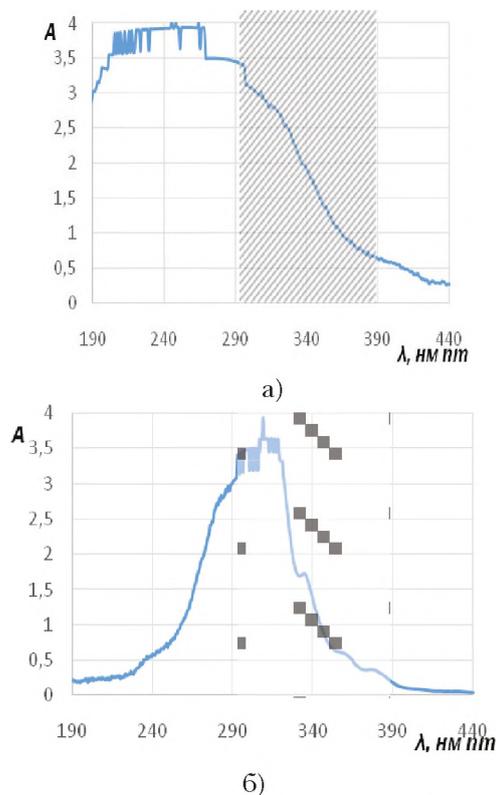
Низкая корреляция между результатами ( $V_{\text{ост}} = 17.63 m_{\text{пвезо}}, R^2 = 0.58$ ) может быть объяснена



**Рис. 3.** Зависимость результатов фракционной перегонки ( $V_{\text{ост}}$ ) от массы не испаряемого остатка ( $m_{\text{пвезо}}$ )

особенностями метода определения неиспаряемого остатка. Стандартный метод предполагает поэтапное нагревание пробы бензина до температуры полного испарения жидкой фазы [9]. В зависимости от состава бензина эта температура может изменяться от 120 до 200 °С. В разрабатываемом способе пьезокварцевого микровзвешивания испарение проводится при температуре не более 100 °С. То есть различие результатов, полученных двумя методами объясняется разным фракционным составом испаряемых соединений и соответственно остатка.

Для установления различий исходного состава проб бензина А-92 использовали молекулярную абсорбционную спектроскопию относительно гексана (рисунк 4). Для идентификации компонентов нефтяных фракций используют спектры поглощения в средней УФ-области (190-400 нм) [6]. Благодаря высокой чувствительности УФ-спектроскопия находит применение для определения следов аренов и непредельных углеводородов. Каждая структурная группа характеризуется своим набором полос поглощения. Их положение и число зависит от состава основной части молекул.



**Рис. 4.** Спектры поглощения проб: а – проба 1, б – проба 2

В идентичных условиях получены спектры для всех образцов бензинов А-92. Все спектры проб, за исключением пробы 1, идентичны и характеризуются максимумом светопоглощения в

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

диапазоне 290-320 нм. Идентичность спектров в этой области говорит о близком составе смеси основных компонентов бензинов. При этом, в пробе 1 широкая полоса поглощения соответствует более короткому диапазону длин волн от 200 до 290 нм. Это говорит о том, что в этой пробе больше насыщенных углеводородов. При этом в этой пробе присутствуют и много других соединений, в том числе ненасыщенных углеводородов. То есть проба 1 отличается от других бензинов по фракционному составу.

Особенностью спектров проб 2-8 является наличие менее выраженных пиков в диапазоне 318-380 нм (рисунки 4).

Для сопоставления и установления степени идентичности спектров и состава для проб бензина по нескольким характерным точкам применен принцип сравнения «отпечатков пальцев». Для этого выделен участок спектра, соответствующий диапазону длин волн, при которых поглощают компоненты фактических смол. К таким компонентам относятся ароматические, непредельные углеводороды и легко окисляемые органические вещества [10], которые поглощают в диапазоне длин волн ( $\lambda$ ) 300-400 нм. Для этой области выделили длины волн экстремумов  $\lambda_{экстр}$ , для которых выбраны величины оптических плотностей ( $A$ ).

Для сравнения постоянства качества состава фактических смол в исследуемых бензинах было рассчитано отношение  $A$  для длин волн коротковолновой и длинноволновой областях в виде диаграмм ( $k$ ) (таблица 3, рисунок 5).

При постоянстве состава сложных смесей наборы отношений оптических плотностей при двух характеристических длинах волн для сравниваемых растворов постоянно:

$$A1, \lambda1/A1, \lambda2 = \epsilon1/\epsilon2 = const = k.$$

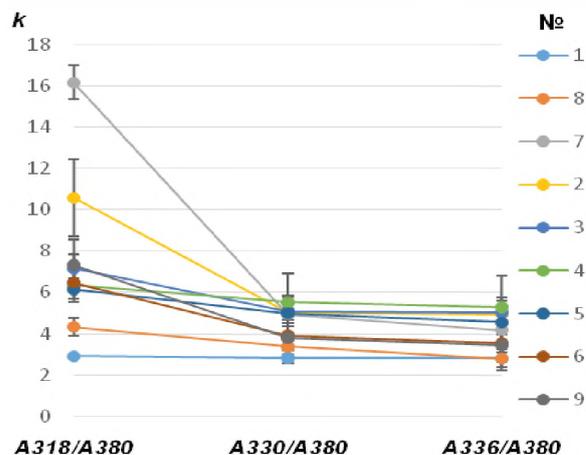
**Таблица 3**

Характеристики спектров для различных проб бензина

№ пробы	A при $\lambda_{экстр}$		A at $\lambda_{экстр}$	
	A318	A330	A336	A380
1	4,00	3,90	3,87	1,38
2	3,63	1,73	1,69	0,34
3	3,63	2,57	2,55	0,51
4	3,93	3,42	3,27	0,62
5	3,93	3,20	2,91	0,64
6	4,00	2,42	2,20	0,62
7	3,23	0,99	0,84	0,20
8	4,00	3,12	2,66	0,92
9	3,93	2,04	1,85	0,54

Представлением  $k$  в виде спектров установлено, что наиболее сильно по качественному составу отличаются пробы 7 и 1. При этом в пробе 1 отмечается наиболее равномерный состав

фракций, т.к. поглощение при длинах волн компонентов, входящих в состав фактических смол практически постоянно. Наиболее не равномерная фракция в пробах 7 и 2.



**Рис. 5.** Спектры параметров  $k$  для различных проб бензина

Для нахождения и оценки тесноты связи между результатами различных методов был использован непараметрический метод для малых выборок ранговой корреляции Спирмена [7]. В качестве рангов выбраны стандартные изменения показателей плотности ( $\rho$ ), не испаряемого остатка ( $V_{ост}$ ), пьезокварцевого микровзвешивания ( $m_{пьезо}$ ), оптическая плотность пика, присутствующего во всех пробах бензина, при характеристической длине волны 380 нм ( $A_{380}$ ) (таблица 4).

**Таблица 4**

Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена для исследуемых бензинов

0,70 – 1,00	Сильная теснота связи	$r_{набл} (A_{380} m_{пьезо})$			
		0.72			
0,30 – 0,69	Средняя теснота связи	$r_{набл} (A_{380} \rho)$			
		0.64			
0 – 0,29	Слабая теснота связи	$r_{набл} (V_{ост} m_{пьезо})$	$r_{набл} (V_{ост} m_{пьезо})$	$r_{набл} (V_{ост} m_{пьезо})$	$r_{набл} (V_{ост} m_{пьезо})$
		0	0	0	0

Установлено, что значения коэффициентов корреляции рангов Спирмена ( $r$ ) для результатов пьезокварцевого микровзвешивания и  $A_{380}$  имеют сильную тесноту связи. Положительное значение коэффициента свидетельствует о наличии прямой связи между признаками и позволяет утверждать, что, чем меньше  $A_{380}$ , тем меньше результаты пьезокварцевого микровзвешивания ( $m$ ), не испаряемого при  $95 \pm 2$  °C остатка бензина.

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

Критическое значение ( $r_{крит}$ ) коэффициента Спирмена при данном числе степеней свободы ( $n=9$ ) составляет 0,68 [8];  $r_{набл} > r_{крит}$ , т.е зависимость признаков является статистически значимой.

Коэффициенты Спирмена показывают, что из всех примененных методов анализа бензинов, наиболее коррелируют между собой спектрофотометрия и пьезокварцевое микровзвешивание. Отсутствие корреляции стандартного метода ( $V_{ост}$ ) и пьезокварцевого микровзвешивания (0) может быть объяснено особенностями метода определения неиспаряемого остатка. Следовательно, наиболее объективным методом отражения состава и его постоянстве является спектрофотометрия.

### Выводы

Положительно оценена возможность применения метода пьезокварцевого микровзвешивания для разработки экспрессного способа оценки нелетучего остатка бензинов. В отличие от спектроскопии достоинство предложенного метода заключается в миниатюрности оборудования и минимальном объеме пробы для анализа.

### Литература

1. ТР ТС 013/2011. О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и мазуту. М., 2011.
2. Гуреев А.А., Азев В.С. Автомобильные бен-

зины. Свойства и применение. М.: Нефть и газ, 1996. 444 с.

3. ГОСТ 1567-97 (ИСО 6246-95). Нефтепродукты. Бензины автомобильные и топлива авиационные. Метод определения смол выпариванием струей. Введен 01.07.1999. М.: ИПК Издательство стандартов, 1999.

4. ГОСТ 8489-58. Топливо моторное. Метод определения фактических смол (по Бударову). Введен 01.07.1986. М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.

5. Кучменко Т.А. Химические сенсоры на основе пьезокварцевых микровесов. М.: Наука, 2011. С.127-203.

6. Ультрафиолетовая и инфрокрасная спектроскопия нефтяных фракций [Электронный ресурс]: [сайт]. URL: [http://studopedia.su/15\\_6293\\_bumazhnaya-hromatografiya-smolistih-veshchestvi-asfaltenov.html](http://studopedia.su/15_6293_bumazhnaya-hromatografiya-smolistih-veshchestvi-asfaltenov.html).

7. Коэффициент ранговой корреляции Спирмена [Электронный ресурс]: [сайт]. URL: [http://edu.alnam.ru/book\\_mkor.php?id=41](http://edu.alnam.ru/book_mkor.php?id=41).

8. Задачи оптимизации [Электронный ресурс]: [сайт]. URL: [http://www.uchimatchast.ru/teory/spirman\\_primer.php](http://www.uchimatchast.ru/teory/spirman_primer.php).

9. Определение фракционного состава топлива [Электронный ресурс]: [сайт]. URL: [http://studopedia.su/14\\_73816\\_opredelenie-fraktsionnogo-sostava-benzinov.html](http://studopedia.su/14_73816_opredelenie-fraktsionnogo-sostava-benzinov.html).

10. О бензине [Электронный ресурс]: [сайт]. URL: <http://www.aviajournal.com/arhiv/2004/05/02.html>.

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 658.562

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ И  
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО  
РЕСУРСА СОСУДОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ  
ОБЪЕКТОВ РАКЕТНОГО ВООРУЖЕНИЯ ДЛЯ  
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОЙ БЕЗАВАРИЙНОЙ  
ЭКСПЛУАТАЦИИ ПО ТЕКУЩЕМУ  
ТЕХНИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ**

**METHODOLOGY FOR ASSESSING RELIABILITY  
AND PREDICTING THE RESIDUAL LIFE OF  
HIGH-PRESSURE VESSELS OF MISSILE  
WEAPONS FACILITIES TO ENSURE A LONG-  
TERM TROUBLE-FREE OPERATION ACCORDING  
TO THE CURRENT TECHNICAL STATE**



**Алексей Геннадьевич Попов**  
кандидат технических наук  
старший научный сотрудник  
начальник Управления прочностных  
исследований и технической диагностики  
МОУ «ИИФ»  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7(4967)12-80-04  
E-mail: upitd@iifmail.ru

**Екатерина Олеговна Оленевская**  
научный сотрудник отдела  
прочностных исследований и  
контроля состояния конструкций  
МОУ «ИИФ»  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7(4967)12-80-04  
E-mail: upitd@iifmail.ru

**Антон Владимирович Агеев**  
инженер-испытатель  
испытательной лаборатории  
МОУ «ИИФ»  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7(4967)12-80-04  
E-mail: upitd@iifmail.ru

## Аннотация

В статье изложена методика оценки надежности и прогнозирования остаточного ресурса сосудов высокого давления объектов ракетного вооружения для обеспечения длительной безаварийной эксплуатации по текущему техническому состоянию. Рассмотрены решения задач, связанных с надежностью сосудов высокого давления в двух постановках.

**Ключевые слова:** сосуды высокого давления, техническое состояние, надежность, остаточный ресурс.

## Summary

The article describes the methodology for assessing the reliability and predicting the residual life of high pressure vessels of missile weapons to ensure a long-term trouble-free operation according to the current technical state. The solutions of the problems related to the reliability of high pressure vessels in two sets are considered.

**Keywords:** high pressure vessels, technical state, reliability, residual life.

Современной тенденцией развития системы эксплуатации ВВТ является переход на метод технической эксплуатации по состоянию (ТЭС), основной целью которой является сокращение затрат и средств их технического обслуживания

и ремонта (ТОиР) при одновременном обеспечении заданных уровней надежности, безотказности и эффективности.

ТЭС – эксплуатация, при которой образец ВВТ или его составная часть эксплуатируются

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

до достижения предотказного состояния или отказа (если это допустимо) и замене изделия в этом случае при всех видах ТОиР.

При ТЭС наиболее полно используются заложенные при проектировании и производстве ресурсные возможности образцов ВВТ и их систем.

Сложившейся практикой эксплуатации ВВТ РВСН по ТЭС является поэтапное продление назначенных показателей ресурса и срока службы в соответствии с ГОСТ РВ 15.702-94 [1]. В результате контроля при выполнении плановых работ параметров, характеризующих техническое состояние, оценивается техническое состояние составных элементов ВВТ.

При этом большое значение приобретает задача расчета и прогнозирования надежности входящих в состав систем ВВТ сосудов высокого давления, являющихся объектами повышенной опасности.

Примем, в соответствии с ГОСТ 27.002-2015 [2], в качестве характеристики надежности сосуда высокого давления вероятность отсутствия разрушения,  $P_B(t)$  являющуюся в рассматриваемом случае функцией времени  $t$ . Она определяется сочетанием случайных величин – прочностных характеристик металла сосуда, работающего под давлением, и действующих напряжений.

Прочностные характеристики металла сосуда, имеющие технологический разброс на момент изготовления, изменяются в результате деградиационных процессов происходящих при длительном воздействии эксплуатационных нагрузок (снижение предела прочности, предела текучести) [3].

Напряжения, действующие в стенке сосуда, являются так же случайной величиной, на которую оказывают влияние температурные условия эксплуатации и, как следствие, изменяющееся по величине давление газа, а так же коррозионные процессы в металле.

Для оценки надежности конструкции сосуда высокого давления, находящегося продолжительное время в эксплуатации, введем, по аналогии с [4], функцию резерва прочности

$$R(t) = r(t) - q(t), \quad (1)$$

где  $r(t)$ ,  $q(t)$  – случайные функции изменяющихся во времени прочностных характеристик металла и величины напряжений в стенке сосуда при воздействии эксплуатационной нагрузки.

Условием сохранения прочности сосуда давления является  $R(t) > 0$ .

В предположении отсутствия корреляционной связи между  $r(t)$  и  $q(t)$  имеют место соотношения, справедливые при любых законах распределения [5]

$$\begin{aligned} m_R(t) &= m_r(t) - m_q(t) \\ D_R(t) &= D_r(t) + D_q(t) \\ \tilde{\sigma}_R(t) &= \sqrt{D_r(t) + D_q(t)} \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} m_R(t), m_r(t), m_q(t) \\ D_R(t), D_r(t), D_q(t) \\ \tilde{\sigma}_R(t), \tilde{\sigma}_r(t), \tilde{\sigma}_q(t) \end{aligned} \quad \text{– математические ожидания, дисперсии и стандартные отклонения соответствующих случайных функций.}$$

Точечные оценки величин функций, входящих в выражения (2), могут быть получены при периодическом контроле параметров технического состояния, например, во время РТО.

Для нормального закона распределения  $R(t)$  вероятность отсутствия разрушения

$$P_B(t) = \frac{1}{2} + \Phi[\gamma(t)], \quad (3)$$

где  $\Phi[\gamma(t)]$  – функция Лапласа;

$\gamma(t)$  – характеристика безопасности [4], имеющая вид

$$\gamma(t) = \frac{m_R(t)}{\tilde{\sigma}_R(t)} = \frac{1}{A_R}. \quad (4)$$

Соотношение между величинами  $\gamma$  и  $P_B$  характеризуют данные, приведенные в таблице 1. Здесь и далее для упрощения записи опускается зависимость от  $t$ .

**Таблица 1**

Значения  $P_B$  и соответствующие им величины  $\gamma$

РБ	0,691	0,841	0,9	0,99	0,999	0,9999	0,99999
$\gamma$	0,50	1,00	1,28	2,32	3,15	3,77	4,264

Под коэффициентами запаса по пределу текучести  $n_T$  и пределу прочности  $n_\sigma$  принято понимать отношения

$$n_T = \frac{m_{r_0}}{m_q}, \quad n_\sigma = \frac{m_{\sigma_0}}{m_q}. \quad (5)$$

где  $m_{r_0}(t)$ ,  $m_{\sigma_0}(t)$ , – математические ожидания предела текучести и предела прочности соответственно.

Из выражения (4) с учетом равенств (2), (5) следует

$$\gamma = \frac{n-1}{\sqrt{A_r^2 \cdot n^2 + A_q^2}}, \quad (6)$$

где  $A_r$ ,  $A_q$  – коэффициенты вариации прочностных характеристик металла и напряжений, действующих в стенке сосуда высокого давления, выражения которых имеют вид

$$A_r = \frac{\sqrt{D_r}}{m_r} = \frac{\tilde{\sigma}_r}{m_r}, \quad A_q = \frac{\sqrt{D_q}}{m_q} = \frac{\tilde{\sigma}_q}{m_q}. \quad (7)$$

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Вычисление функции Лапласа в формуле (3) с помощью современных пакетов математических систем затруднений не вызывает, кроме того для этого существует справочная литература, например, [6]. Вместе с тем, при аналитическом исследовании взаимосвязей параметров в решаемой задаче необходимо иметь аппроксимацию  $P_B = P_B(\gamma)$ .

Предлагается в качестве таковой использовать степенную зависимость

$$P_B(\gamma) = 1 - \frac{1}{2} \cdot (1 - 0,22 \cdot \gamma)^5. \quad (8)$$

Качество аппроксимационной зависимости (8) характеризует график относительной погрешности

$$\delta = |P_{B_{\text{анп}}}(\gamma) - P_B(\gamma)| / P_B(\gamma)$$

от  $\gamma$ , представленный на рисунке 1. Из графика и данных таблицы 1 следует, что в представляющем наибольший интерес диапазоне  $P_B = 0,9$  и более ( $\gamma > 1,28$ ), погрешность аппроксимации не превышает 0,5%.



**Рис. 1.** Относительная погрешность аппроксимационной зависимости  $P_B = P_B(\gamma)$

Вышеизложенное дает возможность решения задач, связанных с надежностью сосудов высокого давления в двух постановках.

Первая – по величине коэффициента запаса  $n$  (по пределу прочности или пределу текучести), полученному в результате обработки измерительной информации при проведении технического диагностирования и оцененных характеристиках разброса определяемых величин  $A_r, A_q$  определить показатель надежности  $P_B$ . Отметим, что при проведении обследования толщина стенки сосуда, необходимая для вычисления величины действующих напряжений, определяется прямыми измерениями. Величины предела прочности и предела текучести могут быть вычислены по корреляционным зависимостям через измеренные величины твердости.

Для решения этой задачи из соотношения (8) с учетом (6) получаем расчетную формулу

$$P_B(n) = 1 - \frac{1}{2} \cdot \left( 1 - \frac{0,22 \cdot (n-1)}{\sqrt{A_r^2 \cdot n^2 + A_q^2}} \right)^5. \quad (9)$$



**Рис. 2.** Зависимости показателя надежности от коэффициента запаса при коэффициентах вариации:

- $A_r=0,05, A_q=0,05$  – сплошная линия;
- $A_r=0,1, A_q=0,05$  – пунктирная;
- $A_r=0,15, A_q=0,05$  – штрихпунктирная

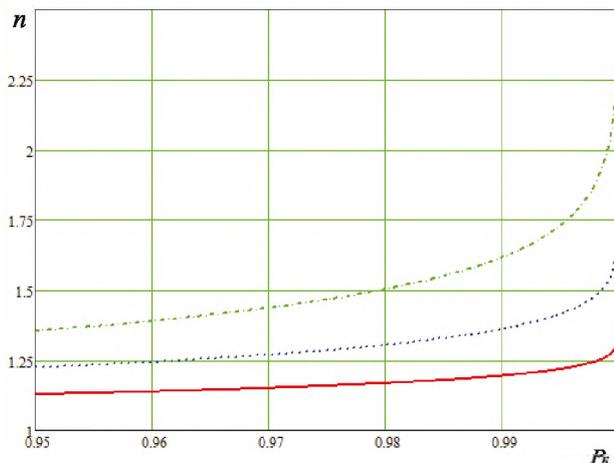
Из зависимости (9) следует, что на величину показателя надежности в большей степени оказывает влияние разброс прочностных характеристик металла стенки сосуда, характеризуемый коэффициентом вариации  $A_r$ . Большой разброс прочностных характеристик металла сосуда приводит к необходимости назначения больших коэффициентов запаса для достижения требуемого уровня надежности.

Вторая постановка задачи – при заданных уровне надежности и коэффициентах корреляции  $A_r, A_q$  определить требуемые величины коэффициентов запаса по пределу текучести и пределу прочности. Для сосудов высокого давления, как элементов сложной технической системы ВВТ, может быть назначен требуемый уровень надежности исходя из назначенного значения этого показателя для всей системы в целом. Установленные ГОСТ 14249 [7], ГОСТ Р 52857.1 [8] для всех сосудов высокого давления величины  $n_r=1,5$  и  $n_s=2,4$  могут отличаться от значений обеспечивающих заданный уровень надежности.

Полученная для решения этой задачи зависимость  $n(P_B, A_r, A_q)$ , пренебрегая членами малости порядка  $A_q^2 \cdot A_r^2$ , имеет вид

$$n = \frac{0,048 + 0,22 \cdot \left\{ 1 - [2 \cdot (1 - P_B)]^{\frac{1}{5}} \right\} \cdot \sqrt{A_q^2 + A_r^2}}{0,048 - A_r^2 \cdot \left\{ 1 - [2 \cdot (1 - P_B)]^{\frac{1}{5}} \right\}^2}. \quad (10)$$

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



**Рис. 3.** Зависимости коэффициента запаса от показателя надежности при коэффициентах вариации:

$A_r=0,05, A_q=0,05$  – сплошная линия;

$A_r=0,1, A_q=0,05$  – пунктирная;

$A_r=0,15, A_q=0,05$  – штрихпунктирная

Основываясь на данных технического диагностирования баллонов стальных бесшовных большого объема в количестве 36 штук, рассчитанных на 250 атмосфер, и 54 штук, рассчитанных на 400 атмосфер, получаем коэффициент вариации прочностных характеристик  $A_r \sim 0,05 \div 0,1$  и коэффициент вариации нагрузки  $A_q \sim 0,05$ .

На графиках *рисунка 3* видно, что высокий уровень надежности достижим даже при малых величинах коэффициента запаса  $n \sim 1,25 \div 1,5$  при малом и умеренном разбросе прочностных характеристик  $A_r \sim 0,05 \div 0,1$ .

При значительном разбросе  $A_r = 0,15$  и более высокая надежность обеспечивается при коэффициентах запаса больше двух.

С использованием формул (9), (10) могут быть

оценены величины  $n, P_B$  по информации, полученной в результате диагностирования технического состояния на момент обследования. При периодических диагностированиях технического состояния сосудов высокого давления определяется ряд значений величин  $m_r(t_i), m_q(t_i), m_q(t_i), \tilde{\sigma}_r(t_i), \tilde{\sigma}_r(t_i), \tilde{\sigma}_q(t_i), D_r(t_i), D_r(t_i), D_q(t_i), A_r(t_i), A_q(t_i)$  ( $i=1, 2, 3, \dots, k$ ), соответствующих моментам времени  $t_i$ . Имея данные значения для каждого момента времени  $t_i$ , можно получить уравнения, зависящие от времени  $t$ , для прогнозирования надежности, коэффициентов запаса и остаточного ресурса, которые позволяют рассчитать срок эксплуатации до достижения предотказного состояния.

### Литература

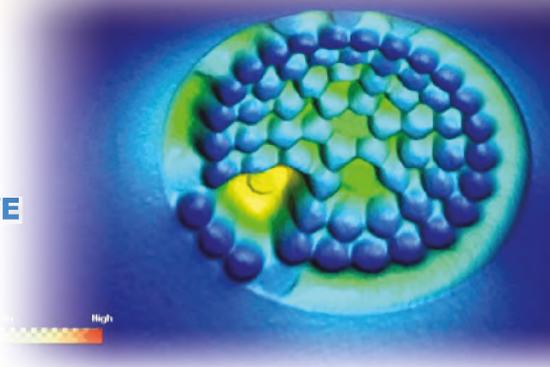
1. ГОСТ РВ 15.702-94 Система разработки и постановки продукции на производство. Военная техника. Порядок установления и продления назначенных ресурса, срока службы, срока хранения.
2. ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике. Термины и определения.
3. Горицкий В.М. Диагностика металлов. М.: Металлургиздат, 2004. 408 с.
4. Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. М.: Стройиздат, 1978. 239 с.
5. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. 576 с.
6. Митропольский А.К. Интеграл вероятностей. Л.: Изд-во ЛГУ, 1972. 87 с.
7. ГОСТ 14249-89 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность.
8. ГОСТ Р 52857.1-2007 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования.

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.039 53.05; 53.043

## РЕГИСТРАЦИЯ ЭФФЕКТА СЕЛЕКТИВНОЙ СЕПАРАЦИИ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ: ОБОСНОВАНИЕ, ЭКСПЕРИМЕНТЫ

## REGISTRATION OF THE EFFECT OF SELECTIVE SEPARATION OF THERMAL NEUTRONS: JUSTIFICATION, EXPERIMENTS



### **Илья Михайлович Анфимов**

инженер  
Национальный исследовательский  
технологический университет МИСиС  
Адрес: 119991, Москва,  
Ленинский проспект, д. 4  
Тел.: +7(495)955-00-32  
E-mail: ilan@tzirechnoy.com

### **Юрий Васильевич Дробышевский**

кандидат химических наук  
директор по развитию  
ООО «Протиус»  
Адрес: 124460, Москва, г. Зеленоград,  
площадь Шокина, д. 2, строение 4  
Тел.: +7 (903)724-08-22  
E-mail: drbshevski@mail.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 Александрович Некрасов**

кандидат технических наук  
кандидат экономических наук  
старший научный сотрудник  
Центральный экономико-  
математический институт РАН  
Адрес: 117418, Москва,  
Нахимовский проспект, д. 47  
Тел.: 8(916)475-36-14  
E-mail: san693@mail.ru

### **Валерий Александрович Варлачев**

доктор технических наук  
заведующий лабораторией  
Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет  
Адрес: 634050, г. Томск, проспект Ленина, д. 30  
Тел.: 8(3822)70-64-06  
E-mail: varlachev@tpu.ru

### **Светлана Петровна Кобелева**

доктор технических наук  
Национальный исследовательский  
университет «Московский  
энергетический институт»  
Адрес: 11250, Москва,  
Красноказарменная улица, д. 14  
Тел.: 8(495)362-75-60  
E-mail: kob@misis.ru

### **Геннадий Германович Волков**

доктор физико-математических  
наук, профессор  
ведущий научный сотрудник  
ФГБУ Петербургский институт ядерной  
физики им. Б.П. Константинова  
Адрес: 188300, Ленинградская обл.,  
г. Гатчина, мкр. Орлова роща, д. 1  
Тел.: +7(813)714 60-25  
E-mail: dir@pnpi.nrcki.ru

### **Виктор Михайлович Дунилин**

старший научный сотрудник  
МОУ «ИИФ»  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7(4967)12-80-04  
E-mail: upitd@iifmail.ru

### **Аннотация**

В статье предложена конструкция концентратора нейтронов с каналами эллиптического профиля, выполненный в виде блоков пластин из профилированного графита и алюминия. Нейтронный поток детектировали по изменению удельного электросопротивления пластин монокристаллического кремния. Эффект концентрирования тепловых нейтронов зарегистрирован как на блоке графитовых нейтронных зеркал, так и на блоке алюминиевых тонкостенных эллиптических зеркал. Эксперименты проводили в канале ГЭК-4 на реакторе ИРТ-Т НИ ТПУ.

**Ключевые слова:** тепловые нейтроны, плотность потока нейтронов, пучки тепловых нейтронов, эллиптические зеркала, способ и устройство для исследования потока тепловых нейтронов, нейтронное легирование, кремний.

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

## Summary

In the article the construction of neutron concentrator with channels of elliptical profile made in the form of plate blocks of profiled graphite and aluminum is proposed. Neutron flux was detected by changing the resistivity of single crystal silicon plates. The effect of concentration of thermal neutrons is registered both on the block of graphite neutron mirrors and on the block of aluminum thin-walled elliptical mirrors. Experiments were performed in the channel HEC-4 at the reactor IRT-T TPU ANY.

**Keywords:** thermal neutrons, neutron flux density, thermal neutron beams, elliptical mirror, method and apparatus for investigation thermal neutron beams, neutron transmutation, silicon.

Одной из актуальных задач современной науки и техники является создание устройств, формирующих и использующих направленные высокоинтенсивные пучки тепловых нейтронов. Такие устройства создают путь к разработке высокоэффективных детекторов нейтронов и конструированию ядерных и термоядерных реакторов нового поколения [1-6], новой технологии нейтронного легирования полупроводников [7-9].

Возможность реализации таких устройств обусловлена тем, что поведение нейтронов в замедлителе, вне замедлителя и на границе раздела сред существенно различается. Создание устройства обладающего способностью проводить селекцию нейтронов по направлению в пространстве базируется на применении эффекта отражения нейтронов от поверхности материалов.

Угол полного внешнего отражения нейтронов

$$\varphi_s \approx \arctan g \left( \frac{v_{sp}}{v_0} \right)$$

определяется отношением граничной скорости нейтрона  $V_{sp}$  на поверхности вещества к скорости  $v_0 = 2200$  м/с тепловых нейтронов реактора. Этот угол равен  $\varphi_s = 10^\circ$  для поверхности из графита,  $\varphi_s = 12^\circ$  для поверхности из бериллия,  $\varphi_s = 10,7^\circ$  для поверхности из железа,  $\varphi_s = 11,5^\circ$  для поверхности из никеля,  $\varphi_s = 9,5^\circ$  для меди,  $\varphi_s = 5,0^\circ$  для алюминия [10-12].

В патенте РФ предложена конструкция замедляюще-фокусирующей структуры (ЗФС) на базе пакета нейтронных зеркал эллиптической формы, которая позволяет формировать ориентированные пучки тепловых нейтронов из входящего потока нейтронов реактора [13].

Целью данной работы является экспериментальная проверка эффекта селективной сепарации нейтронов на отдельных пластинах селективирующих элементов и на блоке селективирующих элементов. Для регистрации эффекта селективной сепарации тепловых нейтронов были использованы кремниевые монокристаллические пластины, применение которых позволяет получать портреты интегральных потоков нейтронов в реакторе.

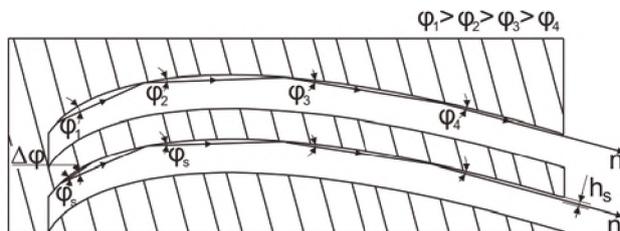
Кремниевые монокристаллические пластины были расположены вблизи пакета пластин селективирующих элементов, облучаемых полем тепловых нейтронов реактора.

В процессе облучения изотопа кремния  $^{30}\text{Si}$  нейтронами образуется стабильный изотоп  $^{31}\text{P}$ , происходит нейтронное легирование кремния [7-9] и изменение его проводимости. Контроль идет путем измерения удельного электросопротивления (УЭС) на поверхности кремниевых пластин. Кремниевые монокристаллические пластины представляют собой удобный датчик нейтронного потока реактора из-за малого сечения взаимодействия кремния с нейтронами, что позволяет измерять стандартные потоки тепловых нейтронов с приемлемой точностью.

## Конструкция и работа устройства фокусирующей структуры

Прежде всего, рассмотрим процесс многократного отражения пристеночного потока тепловых нейтронов на профилированном зеркале с переменной, уменьшающейся кривизной вдоль его движения. В процессе многократного отражения возникает эффект селективной сепарации нейтронов по углу пересечения с поверхностью в каждой ее точке за счет изменяющейся кривизны селективирующих каналов.

Сепарация нейтронов в криволинейных каналах селекции показана на *рисунке 1*.



**Рис. 1.** Селектирование нейтронов в криволинейных каналах селекции:

$\varphi_i$  – угол падения-отражения нейтрона к поверхности при  $i$ -1 отражении;

$\varphi_2 \leq \varphi_1$ ,  $\varphi_1$  – угол к поверхности селективирующего элемента для первичного входа нейтрона  $n$ ;

$\Delta\varphi = \varphi_i - \varphi_j$ ;  $h_s$  – толщина пристеночного слоя селективированного потока

Существенным результатом многократного отражения пристеночных нейтронов на про-

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

филированной поверхности канала, с радиусом кривизны которой гладко растет перед каждым последующим отражением луча, является то, что при этом идет пристеночная концентрация (сжатие) пучка. Эффект реализуется для траекторий, которые начинаются в любой точке поверхности и когда сформировалась цепочка отражений луча нейтрона.

Таким образом, вся поверхность профилированного подобным образом канала ведет себя как непрерывная поверхность стоков в фазовом (угловом) пространстве диффузного поля нейтронов.

Такая совокупность стоков на поверхности интегрирует захваченные нейтроны диффузного поля и выводит их в выделенном кривизной поверхности направлении, при этом концентрируя и увеличивая их фазовую плотность.

Селективный захват нейтронов идет вдоль всей ее профилированной поверхности, а вывод идет на узкой,  $h_s \approx 5$  микрон, полосе у торца (при хорошо полированной поверхности). Поэтому плотность потока вдоль этой полоски может быть большой.

Если угол поверхностного отражения нейтронов поверхностью равен  $\varphi_s$ , радиус кривизны поверхности  $R$ , путь нейтронов между отражениями

$$L_s \approx 2 R \sin(\varphi_s) \approx 5 \text{ мм,}$$

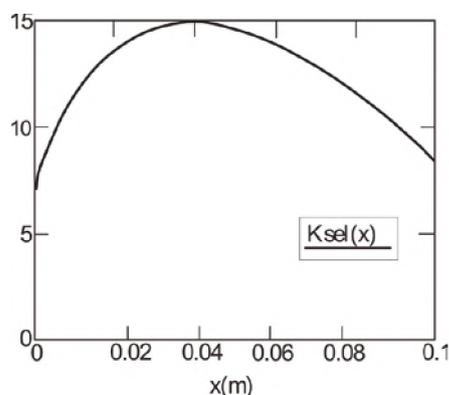
а расстояние траектории от поверхности канала будет

$$h_s \approx R (1 - \cos(\varphi_s)),$$

и коэффициент эффективности захвата нейтронов в ходе селекции  $K_{sel}$  может быть представлен как в [11]:

$K_{sel} = \Delta\varphi/\varphi_s$  – коэффициент эффективности селекции тепловых нейтронов на поверхности пластин селективирующих элементов

$$K_{sel} = \frac{2 \cdot R'_x}{\sqrt{1 - y'_x{}^2}}.$$



**Рис. 2.** Эффективность селекции на поверхности элемента вдоль его длины

Для реализации выбирается такая геометрия селективирующего элемента, чтобы на большей части его поверхности величина  $K_{sel}$  была максимальной. Например, у элемента с профилем эллипса

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1,$$

где  $a=150$  мм и  $b=15$  мм, максимальная эффективность селекции нейтронов;

$K_{sel} = 15$  лежит на участке длины от 5 до 100 мм.

Эффективность селекции  $K_{sel}$  на поверхности элемента вдоль его длины показана на рисунке 2.

При этом селекция должна идти во внешнем диффузном поле тепловых нейтронов или необходимо, чтобы выполнялось условие

$$N_s = \frac{\sigma_s}{\sigma_a} \geq \frac{2 \cdot \pi}{K_{sel} \cdot \varphi_s} \cdot \frac{\pi}{\omega}$$

где  $\sigma_s$  и  $\sigma_a$  – сечения рассеяния и поглощения нейтронов;

$N_s$  – число перерассеяний теплового нейтрона на ядрах вещества до его поглощения, оно должно быть больше количества отражений необходимых для селекции нейтрона поверхностями структуры;  $\omega$  – угол расходимости селективного потока вдоль плоскости селекции.

Для пакета пластин из графита [11]:

$$N_s = 1.3 \cdot 10^3 \geq \frac{2 \cdot \pi}{K_{sel} \cdot \varphi_s \cdot 0.5} \approx 300$$

В результате нейтрон за время его жизни попадет в угловую область захвата нейтрона структурой и уйдет в направлении фокусной области структуры для полезного использования в ней.

Было проведено три эксперимента с проверкой эффекта селективной сепарации нейтронов на профилированных пластинах. В первом эксперименте четыре раздвинутые селективирующие пластины были выполнены из графита, а кремниевые детектирующие пластины были поставлены поперек формируемого ими потока нейтронов. Во втором и третьем эксперименте селективирующие пластины были выполнены из алюминия, собраны пакетом, а детектирующие кремниевые пластины (две во втором эксперименте и одна в третьем) были поставлены вдоль формируемого ими потока нейтронов для того, чтобы можно было проанализировать их угловую расходимость.

Фотография селективирующей пластины из графита в первом эксперименте показана на рисунке 3, а пакет селективирующих элементов во 2 и 3 эксперименте показан на рисунке 4.

Эксперименты проводились в канале ГЭК-4 на реакторе ИРТ-Т НИ Томского политехнического университета [7]. Реактор водно-водяной

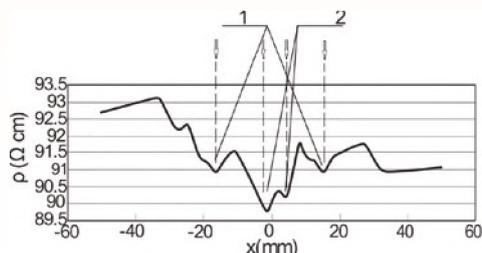
## ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ



**Рис. 3.** Фотография селективирующей пластины из графита в 1-м эксперименте



**Рис. 4.** Фотография пакета селективирующих элементов во 2-м и 3-м экспериментах



**Рис. 5.** Профиль изменения УЭС кремния:  
1 – след нейтронных потоков от внешних селективирующих пластин с  $K_{sel}=10$ ;  
2 – след нейтронных потоков от внутренних селективирующих пластин с  $K_{sel}=15$

бассейнового типа мощностью 6 МВт, замедлитель бериллий. Плотность потока тепловых нейтронов в зоне облучения составляет  $1,0 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , спектральный коэффициент 106.

Интегральный поток нейтронов реактора в первом эксперименте составил  $\Phi_1 = 3,02 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  [14], во втором эксперименте на пакете пластин  $\Phi_2 = 2,9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ , а в третьем эксперименте  $\Phi_3 = 2,3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ .

После облучения в реакторе и спададения наведенной активности были проведены измерения пластин кремния на кафедре полупроводниковой электроники и физики полупроводников в НИТУ МИСИС.

Работа проводилась на автоматизированной установке ВИК УЭС для измерения УЭС полупроводниковых материалов четырехзондовым методом. Снималась карта удельного электросопротивления на поверхности пластин с переменным шагом в цилиндрической системе координат. В связи с высокой эффективностью контроля УЭС кремниевых пластин и наличием зависимости между поглощенной интегральной дозой от потока тепловых нейтронов и проводимостью кремния – это достаточно эффективный метод измерения поля нейтронов в реакторе [12].

Расчетная величина УЭС облученных участков исходного кремния связана с концентрацией носителей  $N_q$  порожденных облучением интегральным потоком нейтронов  $\Phi$  как:

$$\rho_{\text{exp}} = (e \cdot N_q \cdot \mu_n)^{-1},$$

где  $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  кулон;

$\mu_n \approx 1350 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ сек}^{-1}$  – подвижности электронов в кремнии при полученной дозе облучения.

В результате первого эксперимента получена следующая картина изменения удельного электрического сопротивления кремния на следе потока нейтронов от четырех селективирующих пластин [14].

На *рисунке 5* представлен профиль УЭС пластины из первого эксперимента.

Из *рисунка 5* можно сделать следующие выводы:

- эффект селекции тепловых нейтронов селективирующими пластинами явно наблюдается.

Полосы повышенной проводимости кремния (а значит повышенной интенсивности потока нейтронов) находятся в тех районах, где расположены пластины и проводимость в минимумах следа УЭС совпадает с расчетной соответствующей пристеночному потоку  $2,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ;

- заметно различие в глубине профиля УЭС для внутренних и внешних пластин и их эффективность селекции  $K_{sel} = 15$  и  $K_{sel} = 10$  различается в полтора раза;

- широкие области следов связаны рассеянием нейтронов в процессе селекции в связи с низким качеством поверхности селективирующих пластин изготовленных из графита фрезерованием и отличием ее от «зеркальной» поверхности;

- заметно снижение общей проводимости вне следа на периферии пластины ниже расчетной величины в 100 Ом·см.

Во втором и третьем эксперименте использовался пакет из 20 алюминиевых пластин. В этом случае на пакете селективирующих пластин идет сепарация нейтронов внешнего диффузного поля реактора.

Для регистрации эффекта во втором случае использовался пакет из двух кремниевых пластин диаметром 101,8 мм и толщиной 2,4 мм, установленных ребром вдоль направления движения потока нейтронов или в третьем случае из одной пластины толщиной 4 мм.

На *рисунке 6* дан вид детектирующих пластин со стороны открытого торца контейнера.

Селективирующие пластины выполнены из алюминиевой прокатанной ленты (марки А0) толщиной 0,5 мм шириной 70 мм с дистанционирующей отбортовкой по краям, сформированной таким образом, чтобы геометрический фокус, в направлении которого пластины ориентируют селективируемые нейтроны, находился на расстоянии 100 мм от края пластин. Профиль селективирующих пластин, так же как и в первом эксперименте, был выбран в виде части эллипса

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ



**Рис. 6.** Вид детектирующих дисков (1) в контейнере во втором эксперименте

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1.$$

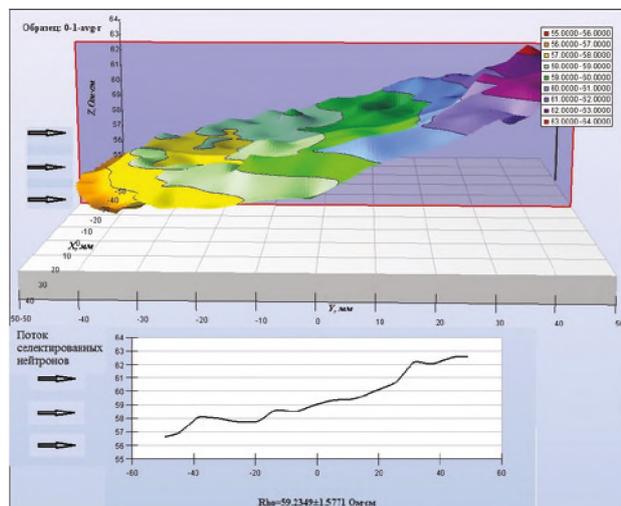
При этом выбирался такой участок поверхности эллипса, на котором коэффициент эффективности селекции тепловых нейтронов имеет максимальное значение.

Ожидаемое среднее удельное электрическое сопротивление кремния при интегральном потоке нейтронов реактора в  $\Phi = 3,02 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  при отсутствии эффекта селекции должно было быть около 96 Ом·см.

Это обычно воспроизводится в экспериментах при среднем потоке тепловых нейтронов в реакторе в  $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \text{ сек}$  с точностью до  $\pm 3 \%$ .

На *рисунке 7* представлена карта распределения УЭС в третьем эксперименте.

При интегральном потоке в  $\Phi = 2,3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  УЭС пластин должно было быть около 120 Ом·см. Ожидаемая плотность потока на следе с  $h_s \approx 5 \text{ мк}$  с одиночной пластины  $1,7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , но расстояние между пластинами пакета 0,7 мм и с учетом того, что диаметр контактного пятна



**Рис. 7.** Изменение УЭС вдоль контрольной кремниевой пластины и карта изменения удельного электросопротивления вдоль контрольной кремниевой пластины

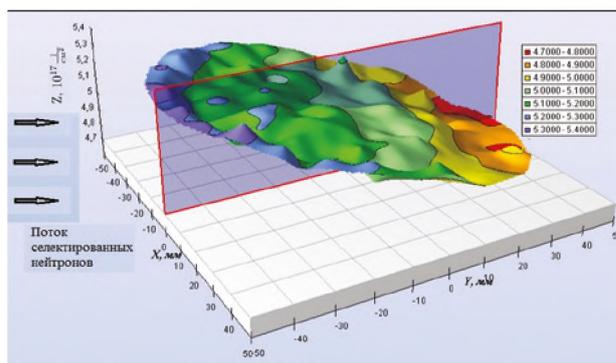
измерительных зондов 0,015 мм, а расстояние между ними 1,3 мм, то реально потоки усредняются и падают. Поэтому на ближнем к пакету крае кремниевой пластины расчетное УЭС должно было быть около 90 Ом·см.

УЭС на облученных кремниевых пластинах оказалась ниже ожидаемой, а значит плотность потока отсеleccionированных тепловых нейтронов экспериментальным блоком элементов селективирующей структуры оказалась более высокой. По результатам измерений проводимости кремния был восстановлен интеграл потока тепловых нейтронов, зарегистрированных на его веществе. При этом

$$\Phi_{\text{exp}} = (e \cdot \rho_{\text{exp}} \cdot \mu_n \cdot n_{\text{Si}} \cdot \sigma_{\text{Si30}} \cdot 0.031)^{-1} \approx \frac{300 \cdot 10^{17}}{\rho_{\text{exp}} (\Omega \cdot \text{см})} \left( \frac{1}{\text{см}^2} \right),$$

где  $n_{\text{Si}}$  – концентрация кремния в пластине; 0,031 – доля изотопа  $\text{Si}_{30}$  в природном кремнии;  $\sigma_{\text{Si30}}$  – сечение взаимодействия нейтронов с  $\text{Si}_{30}$ .

На *рисунке 8* представлена карта распределения интегрального потока нейтронов.



**Рис. 8.** Изменение интегрального потока тепловых нейтронов, зарегистрированных на контрольной кремниевой пластине при интегральном потоке поля нейтронов в реакторе  $\Phi = 2,3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$

Фактически можно говорить о явном, по меньшему мере двукратном, увеличении интегрального потока тепловых нейтронов за счет селективной сепарации нейтронов на пакете из 20 селективирующих элементов. Это также указывает на наличие интенсивного встречного потока нейтронов, направленного к пакету зеркал как к их общему поглощающему стоку, подобно потоку дипольного источника нейтронов.

Обратим внимание и на важный аспект различия эксперимента с нейтронным потоком на графитовых пластинах и эксперимента на алюминиевом пакете.

Угол поверхностного отражения графита  $\varphi_s = 10^\circ$  вдвое больше угла поверхностного отражения алюминия, качество обработки поверхности выше, поэтому отсеleccionированные нейтроны на

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

графите, пройдя все зеркало, сформировали на пластине кремния отпечатки расчетной интенсивности. Сечение рассеяния для алюминия мало. Пробег нейтронов в нем 11,8 см и  $N_s = \sigma/\sigma_a \approx 6$ . Он не является замедлителем. Селекция на блоке пластин алюминия идет во внешнем диффузном поле тепловых нейтронов реактора и нейтроны после селекции и 1-2-х отражений от зеркала срываются, но, не теряя направления, через все тело блока выходят и формируют однородный фон засветки контрольной кремниевой пластины, совпадая с расчетным интегральным потоком нейтронов. Поэтому конструкции селекционирующих, или замедляюще-фокусирующих структур, могут быть различны для разных целевых задач.

Было испытано достаточно простое устройство, в котором плотность в потоке растет, но при этом и угловая расходимость пристеночного пучка падает. Формально как бы нарушается теорема Лиувилля для пучков, которую часто трактуют также как утверждение что «с помощью оптических устройств: волноводов, линз, зеркал разной формы нельзя увеличить плотность в фазовом пространстве».

Теорема Лиувилля утверждает сохранение во времени фазового объема, или плотности вероятности в фазовом пространстве. Простое доказательство теоремы Лиувилля состоит в наблюдении, что эволюция определяется уравнением неразрывности (непрерывности) и замечанием, что разность между этим выражением и уравнением Лиувилля определяется только отсутствием слагаемого, описывающего дивергенцию, что означает отсутствие источников или стоков плотности вероятности.

То есть теорема Лиувилля, в частности теорема Лиувилля для пучков изначально сформулирована для случая систем, в которых истоки и стоки исключены граничными условиями. Но в ЗФС вся поверхность профилированных селекционирующих пластин ведет себя как непрерывная поверхность стоков в фазовом (угловом) пространстве диффузного поля нейтронов и поэтому ключевые элементы устройства селективной сепарации нейтронов лежат вне граничных условий теоремы Лиувилля.

Полученные результаты интересны в разных областях применения плотных нейтронных потоков.

### Выводы

1. Зарегистрирован эффект селективной сепарации нейтронов на селекционирующих элементах из графита и на блоке профилированных пластин из алюминия.

2. На элементах из графита эффект селекции наблюдается явно. Полосы повышенной проводимости кремния (а значит повышенной ин-

тенсивности потока нейтронов) находятся в тех районах, где расположены пластины и проводимость в минимумах следа совпадает с расчетной. С помощью относительно небольшого секториального блока профилированных селекционирующих элементов из алюминия, составляющего 1/45 часть полного цилиндра и имеющего длину 70 мм вдоль цилиндрической структуры, интенсивность потока тепловых нейтронов в выделенной области активной зоны была увеличена вдвое.

3. Полученные экспериментальные результаты можно использовать в разработке высокоэффективных детекторов нейтронов, а также в конструировании ядерных и термоядерных реакторов нового поколения и в создании новых технологий нейтронного легирования полупроводников, или в экспериментальной физике, например, для создания управляемых импульсных источников нейтрино.

### Литература

1. Дробышевский Ю.В., Столбов С.Н. Термоядерный реактор с внутренним каталитическим циклом // SCI-ARTICLE, 2014. № 16. С. 219-232.
2. Дробышевский Ю.В., Столбов С.Н. Ядерная энергетика с внутренним топливным циклом и высокой глубиной выгорания топлива // SCI-ARTICLE, 2015. № 18. С. 66-78.
3. Кутеев Б.В., Гончаров П.З., Сергеев В.Ю., Хрипунов В.И. Мощные нейтронные источники на основе реакций ядерного синтеза // Физика плазмы, 2010. Т 36. № 4. С. 307-346.
4. Reference thermal neutron field at KRISS for calibration of neutron detectors / Kim Y. H., Park H., Kim Y. K., Kim J., Kang J. // RADIATION MEASUREMENTS, 2017, Vol. 107, P. 73-79.
5. Lehmann E., Trtik P., Ridikas D., Status and perspectives of neutron imaging facilities, Neutron imaging for applications in industry and science, Physics Procedia, 2017, Vol. 88, P. 140-147.
6. Boffy R., Beaucour J., Bermejo F. J., A Versatile Device for Thermal Neutron Irradiation of Materials at Grazing Incidence Angles, Nuclear technology, 2017, Vol. 200, No. 1, P. 54-65.
7. Варлачев В.А., Зенков А.Г., Солодовников Е.С. Особенности нейтронно-трансмутационного легирования кремния на исследовательских реакторах // Известия вузов. Физика, 1998. №4. С. 210-215.
8. Varlachev V.A., Solodovnikov E.S., A Thermal Neutron Detector Based on Single-Crystalline Silicon, Instruments and Experimental Techniques, 2009, Vol. 52, No. 3, P. 342-344.
9. Харченко В.А. Легирование полупроводников методом ядерных реакций. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. 272 с.
10. Гуревич И.И., Протасов В.П. Нейтронная физика. М.: Энергоатомиздат, 1997. 416 с.
11. Власов Н.А. Нейтроны. М.: Наука, 1971. 551 с.
12. Игнатович В.К. Нейтронная оптика. М.: Физматлит, 2006. 335 с.
13. Дробышевский Ю.В., Столбов С.Н. Устройство для формирования направленного потока нейтронов. Патент RU №1821818, 1990 г.
14. Варлачев В.А., Дробышевский Ю.В., Некрасов С.А., Петров Г.Н., Прохоров А.К., Столбов С.Н. Экспериментальная регистрация селективной сепарации тепловых нейтронов, SCI-ARTICLE, 2014. №11. С. 11-117.

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 681.2

## КАЛИБРОВКА АДДИТИВНОЙ ПОГРЕШНОСТИ И НЕПЕРПЕНДИКУЛЯРНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ОСЕЙ ДВУХОСЕВОГО МАГНИТОМЕТРА

## CALIBRATION OF THE ADDITIVE ERROR AND NON-PERPENDICULARITY OF THE MEASUREMENT AXES OF A TWO-AXIS MAGNETOMETER



**Максим Борисович Богданов**

кандидат технических наук, доцент  
доцент кафедры «Приборы и  
биотехнические системы»  
ФГБОУ ВО «Тульский  
государственный университет»  
Адрес: 300012, г. Тула, проспект Ленина, д. 92  
Тел.: 8(4872) 35-05-52  
E-mail: bmb75@rambler.ru

**Алексей Олегович Макалов**

студент  
ФГБОУ ВО «Тульский  
государственный университет»  
Адрес: 300012, г. Тула, проспект Ленина, д. 92  
Тел.: 8(4872) 35-05-52  
E-mail: aleks.makalu@outlook.com

### Аннотация

Статья посвящена калибровке двухосевого магнитометра. Показано, что результат влияния на магнитометр Soft Iron Distortion аналогичен тому, что оказывает неперпендикулярность измерительных осей. Рассмотрен и опробован один из методов калибровки магнитометра, позволяющий значительно уменьшить влияние аддитивных погрешностей измерительных каналов и неперпендикулярности измерительных осей магнитометра.

**Ключевые слова:** магнитометр, погрешность, калибровка.

### Summary

The article is devoted to the calibration two-axis magnetometer. It is shown that the result of the influence on the magnetometer Soft Iron Distortion is similar to that of cross axis. Tested one of the methods of calibration of the magnetometer, which allows to significantly reduce the influence of the additive error of the measuring channels and cross axis of the magnetometer.

**Keywords:** magnetometer, error, calibration.

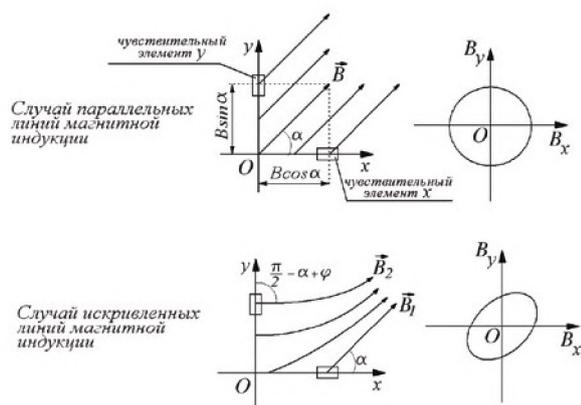
Современный магнитометр – это миниатюрный прибор, применяемый для измерения индукции магнитного поля и представляющий собой микросхему, содержащую чувствительные элементы и сервисную электронику. Размеры таких магнитометров не превышают единиц миллиметров. Малые габариты и относительно низкая стоимость позволяют применять магнитометры для решения широкого круга задач, например, определение направления на магнитный полюс Земли в смартфонах и планшетах, измерение углов в системах ориентации беспилотных летательных аппаратов и т.п.

Как и любой измерительный прибор, магнитометр имеет погрешности. Но погрешности магнитометра имеют особенность, заключающуюся в их зависимости от условий распространения линий магнитной индукции в области установки магнитометра. Это обусловлено тем, что

измеряемая магнитометром физическая величина является векторной, имеет длину и направление, и на нее влияют магнитные свойства окружающих деталей. Так, детали из намагниченного металла создают в окружающей пространстве свое магнитное поле, которое складывается с магнитным полем Земли. В результате магнитометр измеряет проекции индукции суммарного поля, силовые линии которого не совпадают с линиями магнитного поля Земли. Детали из материала с малым магнитным сопротивлением искривляют направление линий индукции магнитного поля. В результате магнитометр измеряет проекции индукции искривленного магнитного поля. Погрешности магнитометра, обусловленные указанными факторами, в иностранной литературе [1] называются «Hard Iron Distortion» (искажение твердого железа) и «Soft Iron Distortion» (искажение мягкого железа).

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Первая погрешность носит добавочный характер, и при неизменности окружающего магнитометра пространства она постоянна, поэтому ее можно рассматривать как аддитивную погрешность магнитометра. Для пояснения влияния на показания магнитометра искривления линий магнитной индукции воспользуемся *рисунком 1*.



**Рис. 1.** К пояснению влияния магнитного поля с искривленными линиями магнитной индукции на показания магнитометра с разнесенными чувствительными элементами

С измерительными осями магнитометра свяжем систему координат  $O_{xy}$ , в которой оси  $O_x$  и  $O_y$  перпендикулярны друг другу. В случае параллельных линий магнитной индукции проекции ее вектора  $\vec{B}$  на измерительные оси равны:

$$B_x = B \cos \alpha \quad \text{и} \quad B_y = B \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) = B \sin \alpha, \quad (1)$$

где  $B_x, B_y$  – проекции магнитной индукции на измерительные оси магнитометра;

$\alpha$  – угол между вектором  $\vec{B}$  и осью  $O_x$ .

Из (1) следует, что при изменении угла  $\alpha$  от 0 до  $2\pi$ , т.е. при повороте магнитометра вокруг оси  $Oz$  перпендикулярной осям  $Ox$  и  $Oy$ , показания измерительных каналов представляют собой периодические функции с амплитудой  $B$ , изменяющиеся по законам косинуса и синуса. Если в течение поворота производить регистрацию показаний магнитометра, а затем изобразить их в виде точек с координатами  $(B_x, B_y)$  в системе координат  $OB_xB_y$ , то получившаяся фигура будет представлять собой круг с радиусом  $B$ , который можно видеть на *рисунке 1*.

Если силовые линии магнитной индукции искривлены, а чувствительные элементы магнитометра разнесены в пространстве, то линии пересекают элементы под углами  $\alpha$  и  $(\frac{\pi}{2} - \alpha + \varphi)$ , где  $\varphi$  – угол искривления силовых линий магнитной индукции в районе установки магнитометра.

Выражения для проекций индукции на оси чувствительности примут вид:

$$B_x = B_1 \cos \alpha \quad \text{и} \quad B_y = B_2 \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha + \varphi\right), \quad (2)$$

где  $B_1$  и  $B_2$  – величина магнитной индукции в районе установки соответствующего чувствительного элемента магнитометра.

Из (2) видно, что показания измерительных каналов магнитометра при его вращении в магнитном поле с искривленными силовыми линиями сдвигаются друг относительно друга на фазу  $\varphi$ . В результате фигура, построенная по показаниям магнитометра в системе координат  $OB_xB_y$  при его вращении в магнитном поле с искривленными силовыми линиями, отличается от круга. На *рисунке 1* показан пример для  $\varphi = \pi/4$ .

Результат влияния искривления линий магнитной индукции аналогичен тому, что может быть получен в магнитном поле с параллельными линиями магнитной индукции, но при наличии в магнитометре неперпендикулярности измерительных осей  $Ox$  и  $Oy$ , т.е. при угле между осями  $(\pi/2 \pm \varphi)$ . Искривление линий зависит от множества факторов, поэтому погрешность типа «Soft Iron Distortion» будем рассматривать как непостоянную неперпендикулярность измерительных осей.

Для компенсации непостоянной аддитивной погрешности магнитометра и непостоянной неперпендикулярности осей необходимо периодически выполнять калибровку магнитометра. Рассмотрим один из известных методов калибровки [1]. Алгоритм реализации данного метода обладает относительно малой вычислительной сложностью, что актуально для построенных на магнитометре измерительных приборов, в которых в качестве вычислительного устройства, как правило, применяются микроконтроллеры [2] с меньшей, чем у ПЭВМ производительностью.

## Метод калибровки

Сначала оценивают аддитивные погрешности  $\Delta X$  и  $\Delta Y$  измерительных каналов, которые приводят к тому, что эллипс смещается относительно центра системы координат  $OB_xB_y$  (*рисунком 2, а*):

$$\Delta X = \frac{\min(D_x) + \max(D_x)}{2},$$

$$\Delta Y = \frac{\min(D_y) + \max(D_y)}{2}.$$

С использованием полученных оценок выполняют компенсацию аддитивных погрешностей:

$$D_{ax} = D_x - \Delta X, \quad D_{ay} = D_y - \Delta Y, \quad (3)$$

где  $D_{ax}$  и  $D_{ay}$  – сигналы измерительных каналов магнитометра после компенсации аддитивных погрешностей.

После компенсации аддитивных погрешно-

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

стей эллипс смещается в центр системы координат  $OB_xB_y$  (рисунк 2, б).

**Рис. 2.** К пояснению метода калибровки магнитометра:

- а) результат влияния аддитивных погрешностей на показания магнитометра;
- б) показания магнитометра после компенсации аддитивных погрешностей измерительных каналов:  $D_x$  и  $D_y$  – сигналы измерительных каналов магнитометра,  $max$  и  $min$  – максимум и минимум сигнала,  $a$  и  $b$  – большая и малая полуоси эллипса,  $\theta$  – угол наклона большой полуоси эллипса к оси  $Ox$ , точка  $A$  – конец большой полуоси эллипса с координатами  $(Ax, Ay)$

Для компенсации неперпендикулярности измерительных осей необходимо оценить коэффициент растяжения эллипса:

$$\sigma = \frac{a}{b},$$

где  $a$  и  $b$  – малая и большая полуоси эллипса:

$$a = \max\left(\sqrt{D_{a,x}^2 + D_{a,y}^2}\right),$$

$$b = \min\left(\sqrt{D_{a,x}^2 + D_{a,y}^2}\right).$$

Затем необходимо оценить наклон  $\theta$ . С учетом того, что точка  $A$  может располагаться в любом квадранте системы координат  $OB_xB_y$ , наклон определяется с помощью системы:

$$\theta = \begin{cases} \arctan\left(\frac{Ay}{Ax}\right), \text{ при } Ax > 0, \\ \arctan\left(\frac{Ay}{Ax}\right) + \pi, \text{ при } Ax < 0 \text{ и } Ay \geq 0, \\ \arctan\left(\frac{Ay}{Ax}\right) - \pi, \text{ при } Ax < 0 \text{ и } Ay < 0, \\ \pi/2, \text{ при } Ax = 0 \text{ и } Ay > 0, \\ -\pi/2, \text{ при } Ax = 0 \text{ и } Ay < 0. \end{cases} \quad (4)$$

В современных пакетах математического моделирования система (4) соответствует программной функции  $\text{atan2}$ .

Компенсация неперпендикулярности измерительных осей по найденным величинам  $\sigma$  и  $\theta$  производится в следующей последовательности: поворот эллипса на угол  $\theta$  так, чтобы малая полуось  $b$  совпала с осью  $OB_y$ ; растяжение малой полуоси эллипса на коэффициент  $\sigma$ ; обратный поворот получившегося круга на угол минус  $\theta$ . Описанную последовательность действий представим в виде матричного преобразования сиг-

налов магнитометра, прошедших компенсацию аддитивных погрешностей:

$$\begin{pmatrix} D_{k,x} \\ D_{k,y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \sigma \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} D_{a,x} \\ D_{a,y} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где  $D_{k,x}$  и  $D_{k,y}$  – сигналы измерительных каналов магнитометра после компенсации аддитивных и мультипликативных погрешностей.

Выражение (5) можно представить в виде:

$$\begin{pmatrix} D_{k,x} \\ D_{k,y} \end{pmatrix} = K \cdot \begin{pmatrix} D_x - \Delta X \\ D_y - \Delta Y \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где  $K$  – калибровочная матрица, позволяющая уменьшить влияние неперпендикулярности измерительных осей магнитометра, определяется найденными величинами  $\sigma$  и  $\theta$ :

$$K = \begin{pmatrix} \cos^2\theta + \sigma \sin^2\theta & \cos\theta \sin\theta - \sigma \sin\theta \cos\theta \\ \cos\theta \sin\theta - \sigma \sin\theta \cos\theta & \sigma \cos^2\theta + \sin^2\theta \end{pmatrix}.$$

Таким образом, метод калибровки двухосевого магнитометра подразумевает выполнение трех этапов:

1. эксперимент, в ходе которого магнитометр разворачивается так, чтобы две его измерительные оси совершили в плоскости горизонта полный круг, в ходе эксперимента необходимо регистрировать сигналы обоих измерительных каналов магнитометра;

2. определение по приведенным выше выражениям аддитивных погрешностей измерительных каналов и калибровочной матрицы;

3. компенсация аддитивных погрешностей измерительных каналов магнитометра и неперпендикулярности его измерительных осей по выражению (6).

Приведенные выше математические выражения для калибровки магнитометра были реализованы в виде программного обеспечения для ПЭВМ. Для оценки работоспособности метода выполнено имитационное моделирование. Исходные данные для моделирования:  $\Delta X = 5 \text{ Гс}$ ,  $\Delta Y = -5 \text{ Гс}$ ,  $\theta = 30^\circ$ ,  $a = 2 \text{ Гс}$ ,  $b = 1 \text{ Гс}$ . В результате выполнения п.2 метода определены следующие величины:  $\Delta X = 5,0 \text{ Гс}$ ,  $\Delta Y = -5,0 \text{ Гс}$ ,  $\theta = 29,977^\circ$ ,  $\sigma = 2,0$ ,

$$K = \begin{pmatrix} 1,2497 & -0,4328 \\ -0,4328 & 1,7503 \end{pmatrix}.$$

В результате выполнения п.3 метода из смещенного эллипса получен центрированный круг. Таким образом, путем имитационного моделирования на ПЭВМ показано, что метод калибровки работоспособен и позволяет оценить и уменьшить погрешности магнитометра.

### Результаты эксперимента

Для проведения эксперимента выбран трехосевой магнитометр НМС5843 компании Honeywell [3]. Магнитометр имеет широкий диапазон измерений  $\pm 4 \text{ Гс}$ , разрешающую способ-

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

ность 7 мГс, частоту измерений до 50 Гц, интерфейс передачи данных I2C, относительно низкую стоимость, порядка 300 рублей.

Для подключения магнитометра к ПЭВМ и регистрации его сигналов на жестком диске использовано устройство Arduino на базе микроконтроллера семейства AVR Atmega328P, для которого разработано программное обеспечение.

После выполнения п.1 метода анализа данных установлено, что сигналы магнитометра содержат шумовую составляющую. Для устранения влияния шума на результат калибровки предлагается сначала удалить из выборки случайные большие выбросы, так называемые «грубые промахи». Для этого можно применить алгоритм на основе идентификатора Хампеля [4]. Затем, необходимо сгладить относительно небольшие выбросы путем применения фильтра Савицкого-Голея [5, 6]. Для выполнения указанных процедур можно воспользоваться пакетом прикладных программ MATLAB. Схема передачи сигналов магнитометра между блоками программного обеспечения показана на *рисунке 3*.

**Рис. 3.** Схема передачи сигналов магнитометра между блоками программного обеспечения в ходе выполнения калибровки

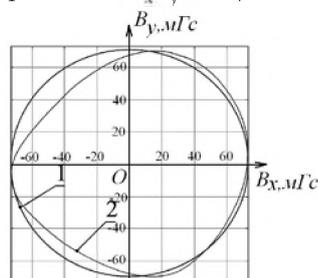
Результат выполнения п.1 метода после устранения шума показан на *рисунке 4*.

**Рис. 4.** Сигналы измерительных каналов магнитометра, зарегистрированные в ходе эксперимента и нанесенные после устранения шумовой составляющей на систему координат  $OB_xB_y$

В результате выполнения п.2 метода калибровки получены следующие значения:  $\Delta X = 148,6 \text{ мГс}$ ,  $\Delta Y = -391,9 \text{ мГс}$ ,  $\theta = -80,80$ ,  $\sigma = 1,81$ ,

$$K = \begin{vmatrix} 0,5650 & -0,0708 \\ -0,0708 & 0,9885 \end{vmatrix}.$$

После выполнения п.3 метода калибровки сигналы магнитометра повторно нанесены на систему координат  $OB_xB_y$ . Результат показан на *рисунке 5*.



**Рис. 5.** Сопоставление результатов калибровки с идеальной окружностью: 1 – окружность, 2 – график, построенный по сигналам магнитометра

Сопоставляя *рисунк 4* и *рисунк 5* видно, что калибровка позволила значительно уменьшить влияние на показания магнитометра аддитивных погрешностей его измерительных каналов и неперпендикулярность его измерительных осей. Тем не менее, результирующая фигура на *рисунке 5* не совпадает с идеальным кругом. Следовательно, показанный метод калибровки в дальнейшем должен быть усовершенствован. Например, с использованием данных не только магнитометра, но и датчика угловой скорости и акселерометра [7].

### Литература

1. Christopher Konvalin. Compensating for Tilt, Hard-Iron, and Soft-Iron Effects. [Электронный ресурс]. 2017. URL: <http://www.sensorsmag.com/> (дата обращения 17.07.2017).
2. 8 bit AVR Microcontroller ATmega328P. Datasheet.pdf. [Электронный ресурс]. 2017. URL: <http://www.atmel.com/> (дата обращения 19.07.2017).
3. 3-Axis Digital Compass IC HMC5843.pdf. [Электронный ресурс]. 2017. URL: <https://aerocontent.honeywell.com/> (дата обращения 19.07.2017).
4. Хампель Ф., Рончетти Э., Рауссей П., Штаэль В. Робастность в статистике. Подход на основе функции влияния. М.: Мир, 1989. 512 с.
5. Abraham Savitzky, M. J. E. Golay. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures [Электронный ресурс]. 2017. URL: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ac60214a047> (дата обращения 19.07.2017).
6. What Is a Savitzky-Golay Filter? [Электронный ресурс]. 2017. URL: <https://www.researchgate.net/publication/> (дата обращения 19.07.2017).
7. Manon Kok, Thomas B. Schön. Magnetometer Calibration Using Inertial Sensors. [Электронный ресурс]. 2017. <https://arxiv.org/abs/1601.05257> (дата обращения 19.07.2017).

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 681.2

## МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОРИЕНТАЦИИ ПУТЕМ СОВМЕСТНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ БИНС И ПРИЕМНОЙ АППАРАТУРЫ СНС С ПРИМЕНЕНИЕМ ОДНОЙ АНТЕННЫ ПО СИГНАЛАМ С ТРЕХ И БОЛЕЕ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ

## A METHOD FOR INCREASING THE ACCURACY OF DETERMINATION OF ORIENTATION PARAMETERS BY JOINT PROCESSING OF THE SIGNALS OF THE BINS AND THE RECEIVING SNS EQUIPMENT USING A SINGLE ANTENNA BY SIGNALS FROM THREE OR MORE NAVIGATION SATELLITES



**Алексей Вячеславович Прохорцов**

кандидат технических наук

заведующий кафедрой «Приборы  
и биотехнические системы»

ФГБОУ ВО «Тульский  
государственный университет»

Адрес: 300012, г. Тула, проспект Ленина, д. 92

Тел.: 8(4872)35-05-52

E-mail: proxav@rambler.ru

### Аннотация

Предложен метод определения параметров ориентации малогабаритных летательных аппаратов с применением одной антенны за счет совместной обработки сигналов с бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) и аппаратуры спутниковой навигационной системы (СНС), т.е. показания БИНС корректируются по параметрам ориентации по сигналам с одноантенной аппаратуры СНС.

**Ключевые слова:** параметры ориентации, бесплатформенная инерциальная навигационная система, спутниковая навигационная система, методы.

### Summary

Method for finding of small flying vehicles orientation parameters is proposed. By means of data coprocessing from strapdown inertial navigation system and satellite navigation system orientation parameters may be calculated by signals from only one antenna. Thus strapdown inertial navigation system is corrected by signals from the one satellite navigation system antenna.

**Keywords:** orientation parameters, strapdown inertial navigation system, satellite navigation system, methods.

Обзор научной литературы [1-25] показал, что существуют различные методы определения параметров ориентации по сигналам спутниковых навигационных систем (СНС), достоинства и недостатки которых приведены в *таблице 1*.

Сравнительный анализ методов определения параметров ориентации позволяет сделать вывод о том, что наиболее точными являются фазовый интерферометрический и радиопеленгационный методы. Однако радиопеленгационный метод в настоящее время практически не используется из-за громоздкости и сложности аппаратуры. Поэтому наибольшее распространение получил фазовый интерферометрический метод, но он требует информацию сразу мини-

мум от трех спутников и обладает тем недостатком, что информацию о параметрах ориентации ПО потребитель получает с некоторым запаздыванием (если в первых образцах запаздывание составляет несколько секунд, то в настоящее время – она не превосходит одной секунды). На основе данного метода строится современная аппаратура СНС для определения параметров ориентации.

Однако данный метод невозможно применить на борту малогабаритных летательных аппаратов (МЛА), т.к. для его реализации требуется использование разнесенной антенной системы. Поэтому предложен метод, определения параметров ориентации МЛА с применением

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

**Таблица 1**

Сравнительные характеристики методов определения параметров ориентации

Метод	Достоинства	Недостатки
Радио-пеленгационный	Реальный масштаб времени, точность 0,01-0,10	Громоздкость и сложность аппаратуры
По отношению сигнал/шум	Простота обработки информации; простая дешевая приемная аппаратура	Низкая точность 3-100
Фазовый интерферометрический	Точность 0,01-0,10	Необходимость решения задачи неоднозначности фазовых измерений (что приводит к определению параметров ориентации не в реальном масштабе времени); специальная дорогая приемная аппаратура; сложность использования на высокочастотных объектах; требуются высокие затраты машинных ресурсов
По измерениям линейных скоростей антенн, расположенных на подвижном объекте	Простая приемная аппаратура; возможность определения также и угловых скоростей ПО	Сложность математической обработки информации; требуются высокие затраты машинных ресурсов; определение параметров ориентации происходит не в реальном масштабе времени
Частотный	Возможность применения на высокочастотных объектах, возможность определения как углового положения объекта, так и угловых скоростей ПО	Специальная дорогая приемная аппаратура; сложность математической обработки информации; требуются высокие затраты машинных ресурсов; определение параметров ориентации происходит не в реальном масштабе времени

одной антенны, за счет совместной обработки сигналов с бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) и аппаратуры СНС, т.е. показания БИНС корректируются по параметрам ориентации по сигналам с одноантенной аппаратуры СНС.

Предлагается метод коррекции показаний БИНС по параметрам ориентации, при котором достаточно информации поступающей с одной антенны аппаратуры СНС и информации с БИНС. Это позволяет существенно уменьшить габариты инерциально-спутниковой навигационной системы (ИСНС).

Сущность предлагаемого метода заключается в следующем:

По сигналам СНС определяется вектор скорости  $V_g^{СНС}$ , проекции которого в базовой системе координат определены:

$$V_g^{СНС} = \begin{pmatrix} V_{Xg}^{СНС} \\ V_{Yg}^{СНС} \\ V_{Zg}^{СНС} \end{pmatrix}.$$

По показаниям БИНС также определяется вектор скорости  $V_g^{БИНС}$ , проекции которого в базовой системе координат определены:

$$V_g^{БИНС} = \begin{pmatrix} V_{Xg}^{БИНС} \\ V_{Yg}^{БИНС} \\ V_{Zg}^{БИНС} \end{pmatrix}.$$

Сравниваем между собой векторы  $V_g^{СНС}$  и  $V_g^{БИНС}$ . Расхождение по длине между этими векторами как показано, определяется в основном

погрешностями акселерометров, а расхождение по направлению определяется погрешностями определения параметров ориентации БИНС, которые в свою очередь в основном зависят от погрешностей ДУСов.

Найдем угол  $\eta$  между векторами  $V_g^{СНС}$  и  $V_g^{БИНС}$ :

$$\cos(\eta) = \frac{V_{Xg}^{СНС} \cdot V_{Xg}^{БИНС} + V_{Yg}^{СНС} \cdot V_{Yg}^{БИНС} + V_{Zg}^{СНС} \cdot V_{Zg}^{БИНС}}{\sqrt{V_{Xg}^{СНС^2} + V_{Yg}^{СНС^2} + V_{Zg}^{СНС^2}} \cdot \sqrt{V_{Xg}^{БИНС^2} + V_{Yg}^{БИНС^2} + V_{Zg}^{БИНС^2}}}$$

Если угол  $\eta$  больше какого-то определенного значения, например  $1^\circ$ , то применяем один из вариантов, описанный ниже, если меньше, то считаем показания БИНС правильными.

Ниже предлагается 4 варианта реализации метода коррекции показаний БИНС.

### Вариант 1. Нахождение обратной матрицы

Найдем матрицу направляющих косинусов  $\Delta C_k$  определяющую положение вектора  $V_g^{БИНС}$  относительно вектора  $V_g^{СНС}$ .

Матричное уравнение, показывающее зависимость вектора относительно вектора имеет вид:

$$V_g^{СНС} = \Delta C_k \cdot V_g^{БИНС}, \quad (1)$$

где  $\Delta C_k$  – матрица направляющих косинусов, определяющая положение вектора  $V_g^{БИНС}$  относительно вектора  $V_g^{СНС}$  в базовой системе координат.

Решая матричное уравнение (1) найдем  $\Delta C_k$ :

$$\Delta C_k = [V_g^{БИНС}]^{-1} \cdot V_g^{СНС}, \quad (2)$$

где  $[V_g^{БИНС}]^{-1}$  – матрица обратная к  $V_g^{БИНС}$ .

По показаниям БИНС определяется положение

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

ние связанной с ПО относительно базовой СК, которое определяется матрицей направляющих косинусов  $C_{\text{БИНС}}$ .

Находим скорректированную матрицу, используя рассчитанную по формуле (2) матрицу  $\Delta C_k$ , и показания БИНС о параметрах ориентации – матрицу  $C_{\text{БИНС}}$ :

$$C_{\text{БИНС}}^{\text{скорректированная}} = \Delta C_k \cdot C_{\text{БИНС}} \quad (3)$$

Далее показания БИНС о параметрах ориентации, т. е. матрица  $C_{\text{БИНС}}$ , заменяются скорректированной матрицей направляющих косинусов  $C_{\text{БИНС}}^{\text{скорректированная}}$ , найденной по формуле (3).

## Вариант 2. Решение системы уравнений

Найдем угол между вектором  $V_{\text{БИНС}}$  и осями связанной с объектом СК ( $OXYZ$ ). Положение СК  $OXYZ$  относительно базовой СК определяется матрицей направляющих косинусов

	OX	OY	OZ
$OX_g$	$c_{11}$	$c_{12}$	$c_{13}$
$OY_g$	$c_{21}$	$c_{22}$	$c_{23}$
$OZ_g$	$c_{31}$	$c_{32}$	$c_{33}$

где  $c_{11} = \cos \Psi \sin \vartheta$ ;

$c_{21} = \sin \vartheta$ ;

$c_{31} = -\sin \Psi \cos \vartheta$ ;

$c_{12} = \sin \gamma \sin \Psi - \cos \gamma \cos \Psi \sin \vartheta$ ;

$c_{22} = \cos \vartheta \cos \gamma$ ;

$c_{32} = \sin \gamma \cos \Psi + \cos \gamma \sin \Psi \sin \vartheta$ ,

$c_{13} = \cos \gamma \sin \Psi + \sin \gamma \cos \Psi \sin \vartheta$ ;

$c_{23} = -\cos \vartheta \sin \gamma$ ;

$c_{33} = \cos \gamma \cos \Psi - \sin \gamma \sin \Psi \sin \vartheta$ ,

где  $\psi, \vartheta, \gamma$  – углы курса, тангажа и крена, определенные БИНС.

Угол  $\alpha_1$  между  $V_{\text{БИНС}}$  и OX определяется по формуле:

$$\cos(\alpha_1) = \frac{c_{11} \cdot V_{Xg}^{\text{БИНС}} + c_{21} \cdot V_{Yg}^{\text{БИНС}} + c_{31} \cdot V_{Zg}^{\text{БИНС}}}{\sqrt{c_{11}^2 + c_{21}^2 + c_{31}^2} \cdot \sqrt{V_{Xg}^{\text{БИНС}^2} + V_{Yg}^{\text{БИНС}^2} + V_{Zg}^{\text{БИНС}^2}} \quad (5)$$

Угол  $\alpha_2$  между  $V_{\text{БИНС}}$  и OY определяется по формуле:

$$\cos(\alpha_2) = \frac{c_{12} \cdot V_{Xg}^{\text{БИНС}} + c_{22} \cdot V_{Yg}^{\text{БИНС}} + c_{32} \cdot V_{Zg}^{\text{БИНС}}}{\sqrt{c_{12}^2 + c_{22}^2 + c_{32}^2} \cdot \sqrt{V_{Xg}^{\text{БИНС}^2} + V_{Yg}^{\text{БИНС}^2} + V_{Zg}^{\text{БИНС}^2}} \quad (6)$$

Угол  $\alpha_3$  между  $V_{\text{БИНС}}$  и OZ определяется по формуле:

$$\cos(\alpha_3) = \frac{c_{13} \cdot V_{Xg}^{\text{БИНС}} + c_{23} \cdot V_{Yg}^{\text{БИНС}} + c_{33} \cdot V_{Zg}^{\text{БИНС}}}{\sqrt{c_{13}^2 + c_{23}^2 + c_{33}^2} \cdot \sqrt{V_{Xg}^{\text{БИНС}^2} + V_{Yg}^{\text{БИНС}^2} + V_{Zg}^{\text{БИНС}^2}} \quad (7)$$

Формулы (4)-(6) определяют положение связанной системы координат относительно вектора скорости определенного по показаниям БИНС.

Далее мы считаем, что правильным является вектор скорости  $V_{\text{БИНС}}$ , определенный по СНС. И поэтому доворачиваем связанную систему координат таким образом, чтобы вектор совпал с

вектором  $V_g^{\text{СНС}}$ , при этом углы между вектором и осями связанной СК должны совпадать с углами, которые были между вектором  $V_g^{\text{БИНС}}$  и осями связанной СК определенными по формулам (4)-(6).

Углы между вектором  $V_g^{\text{СНС}}$  и осями скорректированной связанной СК определяются по формулам:

● угол  $\beta_1$  между  $V_g^{\text{СНС}}$  и OX определяется по формуле:

$$\cos(\beta_1) = \frac{c_{11}^* \cdot V_{Xg}^{\text{СНС}} + c_{21}^* \cdot V_{Yg}^{\text{СНС}} + c_{31}^* \cdot V_{Zg}^{\text{СНС}}}{\sqrt{c_{11}^{*2} + c_{21}^{*2} + c_{31}^{*2}} \cdot \sqrt{V_{Xg}^{\text{СНС}^2} + V_{Yg}^{\text{СНС}^2} + V_{Zg}^{\text{СНС}^2}} \quad (8)$$

● угол  $\beta_2$  между  $V_g^{\text{СНС}}$  и OY определяется по формуле:

$$\cos(\beta_2) = \frac{c_{12}^* \cdot V_{Xg}^{\text{СНС}} + c_{22}^* \cdot V_{Yg}^{\text{СНС}} + c_{32}^* \cdot V_{Zg}^{\text{СНС}}}{\sqrt{c_{12}^{*2} + c_{22}^{*2} + c_{32}^{*2}} \cdot \sqrt{V_{Xg}^{\text{СНС}^2} + V_{Yg}^{\text{СНС}^2} + V_{Zg}^{\text{СНС}^2}} \quad (9)$$

● угол  $\beta_3$  между  $V_g^{\text{СНС}}$  и OZ определяется по формуле:

$$\cos(\beta_3) = \frac{c_{13}^* \cdot V_{Xg}^{\text{СНС}} + c_{23}^* \cdot V_{Yg}^{\text{СНС}} + c_{33}^* \cdot V_{Zg}^{\text{СНС}}}{\sqrt{c_{13}^{*2} + c_{23}^{*2} + c_{33}^{*2}} \cdot \sqrt{V_{Xg}^{\text{СНС}^2} + V_{Yg}^{\text{СНС}^2} + V_{Zg}^{\text{СНС}^2}} \quad (10)$$

где  $c_{11}^* = \cos \psi^* \sin \vartheta^*$ ;

$c_{21}^* = \sin \vartheta^*$ ;

$c_{31}^* = -\sin \psi^* \cos \vartheta^*$ ;

$c_{12}^* = \sin \gamma^* \sin \psi^* - \cos \gamma^* \cos \psi^* \sin \vartheta^*$ ;

$c_{22}^* = \cos \vartheta^* \cos \gamma^*$ ;

$c_{32}^* = \sin \gamma^* \cos \psi^* + \cos \gamma^* \sin \psi^* \sin \vartheta^*$ ,

$c_{13}^* = \cos \gamma^* \sin \psi^* + \sin \gamma^* \cos \psi^* \sin \vartheta^*$ ;

$c_{23}^* = -\cos \vartheta^* \sin \gamma^*$ ;

$c_{33}^* = \cos \gamma^* \cos \psi^* - \sin \gamma^* \sin \psi^* \sin \vartheta^*$ ,

где  $\psi^*, \vartheta^*, \gamma^*$  – скорректированные углы курса.

Приравняем правые части выражений (5) и (8), (6) и (9), (7) и (10) с учетом (4) и (11).

Добавим полученные формулы, условие масштаба и перпендикулярности и решим полученную систему методом наименьших квадратов найдем  $\psi^*, \vartheta^*, \gamma^*$ . При решении методом наименьших квадратов за начальные значения  $\psi^*, \vartheta^*, \gamma^*$  примем  $\psi, \vartheta, \gamma$  – т.е. показания БИНС.

Приведенные выше два способа коррекции БИНС, имеют следующие недостатки:

● не всегда возможно однозначное выполнение операций над матрицами, либо решение системы уравнений;

● требуется значительные вычислительные ресурсы.

Поэтому ниже предлагается рассмотреть другие конечные способы, позволяющие повернуть систему координат относительно произвольной оси.

Т.к. мы доворачиваем связанную систему координат таким образом, чтобы вектор  $V_g^{\text{БИНС}}$  совпал с вектором  $V_g^{\text{СНС}}$ , то данный доворот осуществляется вокруг вектора  $C = (c_x, c_y, c_z)$  опреде-

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

ляемого как векторное произведение векторов  $V_g^{БИНС}$ ,  $V_g^{СНС}$ :

$$C = [V_{X_g}^{БИНС} \times V_{X_g}^{СНС}]. \quad (12)$$

При этом поворот осуществляется на угол  $\eta$  определяемый выражением:

$$\eta = \arccos\left(\frac{V_{X_g}^{СНС} * V_{Y_g}^{БИНС} + V_{Y_g}^{СНС} * V_{X_g}^{БИНС} + V_{Z_g}^{СНС} * V_{Z_g}^{БИНС}}{\sqrt{V_{X_g}^{СНС^2} + V_{Y_g}^{СНС^2} + V_{Z_g}^{СНС^2}} * \sqrt{V_{X_g}^{БИНС^2} + V_{Y_g}^{БИНС^2} + V_{Z_g}^{БИНС^2}}}\right). \quad (13)$$

Т.к. в БИНС могут использоваться разные параметры ориентации [25], то рассмотрим два способа позволяющие осуществить поворот вокруг произвольной оси в пространстве на определенный угол. При этом один способ ориентирован на БИНС использующей в качестве параметров ориентации направляющие косинусы, а другой - параметры Родрига-Гамильтона.

### Вариант 3. Поворот системы координат вокруг произвольной оси в пространстве с использованием направляющих косинусов

Обобщенный случай поворота вокруг произвольной оси в пространстве встречается часто.

Предположим, что произвольная ось в пространстве проходит через начало координат с направляющим вектором  $(c_x, c_y, c_z)$ . Поворот вокруг этой оси на некоторый угол  $\eta$  выполняется по следующему правилу:

- выполнить соответствующие повороты так, чтобы ось вращения совпала с осью  $OZ$ ;
- выполнить поворот на угол  $\eta$  вокруг оси  $OZ$ ;
- выполнить преобразование, обратное тому, что позволило совместить ось вращения с осью  $OZ$ ;

В общем случае для того, чтобы произвольная ось, проходящая через начало координат, совпала с одной из координатных осей, необходимо сделать два последовательных поворота вокруг двух других координатных осей. Для совмещения произвольной оси вращения с осью  $OZ$  сначала выполним поворот вокруг оси  $OX$ , а затем вокруг оси  $OY$ . Чтобы определить угол поворота  $\alpha$  вокруг оси  $OX$ , используемый для перевода произвольной оси в плоскость  $OXZ$ , спроецируем сначала на плоскость  $OXZ$  направляющий единичный вектор этой оси (рисунк 1). Компоненты  $y$  и  $z$  спроецированного вектора равны  $c_y$  и  $c_z$  – компонентам единичного направляющего вектора оси вращения. Из рисунка 1а следует, что

$$d = \sqrt{c_y^2 + c_z^2}, \quad (14)$$

$$\cos \alpha = \frac{c_z}{d}, \quad \sin \alpha = \frac{c_y}{d}. \quad (15)$$

После перевода в плоскость  $OXZ$  с помощью поворота вокруг оси  $OX$ ,  $z$ -компонента единичного вектора равна  $d$ , а  $x$ -компонента равна  $c_x$ , как это показано на рисунке 1 б. Длина единич-

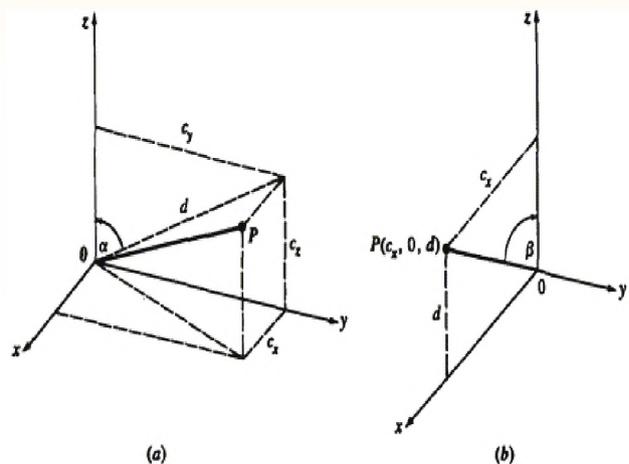


Рис. 1. Повороты, необходимые для совмещения с осью  $z$  единичного вектора  $OP$ : а) – вокруг оси  $OX$ ; б) – вокруг оси  $OY$ .

ного вектора равна, конечно, 1. Таким образом, угол поворота  $\beta$  вокруг оси  $OY$ , необходимый для совмещения произвольной оси с осью  $OZ$ , равен

$$\cos \beta = d, \quad \sin \beta = c_x. \quad (16)$$

Тогда полное преобразование можно представить в виде матрицы

$$[M] = [R_x] \cdot [R_y] \cdot [R_\delta] \cdot [R_y]^{-1} \cdot [R_x]^{-1}. \quad (17)$$

Поскольку матрицы поворота ортогональны, формулу (17) можно упростить, заменив операцию обращения операцией транспонирования:

$$[M] = [R_x] \cdot [R_y] \cdot [R_\delta] \cdot [R_y]^T \cdot [R_x]^T. \quad (18)$$

Матрица преобразования поворота вокруг оси  $OX$ :

$$[R_x] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_z/d & c_y/d \\ 0 & -c_y/d & c_z/d \end{bmatrix} \quad (19)$$

и вокруг оси  $OY$ :

$$[R_y] = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d & 0 & c_x \\ 0 & 1 & 0 \\ -c_x & 0 & d \end{bmatrix}. \quad (20)$$

И, наконец, вращение вокруг произвольной оси задается матрицей поворота вокруг оси  $OZ$ :

$$[R_\delta] = \begin{bmatrix} \cos \eta & \sin \eta & 0 \\ -\sin \eta & \cos \eta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (21)$$

где угол  $\eta$  определяется выражением (13)

Т.о. для реализации данного способа коррекции показаний БИНС по параметрам ориентации, необходимо матрицу  $C_g$  умножить на матрицу  $M$  определяемую выражением (18):

$$C_g^{сноп} = C_g \cdot M. \quad (22)$$

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

## Вариант 4. Поворот вокруг произвольной оси в пространстве с использованием параметров Родрига-Гамильтона

В соответствии с теоремой Эйлера о конечном повороте представим доворот связанной системы координат таким образом, чтобы вектор  $V_g^{БИНС}$  совпал с вектором  $V_g^{СНС}$ , как поворот вокруг вектора  $C=(c_x, c_y, c_z)$  на угол  $\eta$ .

Введем параметры Родрига-Гамильтона соответствующие такому повороту.

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= \cos\left(\frac{\eta}{2}\right), \\ \lambda_1 &= \sin\left(\frac{\eta}{2}\right) \cdot \frac{c_x}{\sqrt{c_x^2 + c_y^2 + c_z^2}}, \\ \lambda_2 &= \sin\left(\frac{\eta}{2}\right) \cdot \frac{c_y}{\sqrt{c_x^2 + c_y^2 + c_z^2}}, \\ \lambda_3 &= \sin\left(\frac{\eta}{2}\right) \cdot \frac{c_z}{\sqrt{c_x^2 + c_y^2 + c_z^2}}. \end{aligned} \quad (23)$$

Объединим параметры Родрига-Гамильтона (22) в единую математическую величину, называемую «кватернионом». Под кватернионом понимают число, составленное из действительной единицы 1 и трех мнимых единиц  $i, j, k$  с действительными элементами:

$$\Lambda = 1\lambda_0 + i\lambda_1 + j\lambda_2 + k\lambda_3. \quad (24)$$

Т.о. для реализации данного способа коррекции показаний БИНС по параметрам ориентации, необходимо кватернион  $\Lambda$  определяемый выражением (24) умножить на кватернион определяющий параметры ориентации по БИНС

$$\begin{aligned} \Lambda_g &= 1\lambda_{0_g} + i\lambda_{1_g} + j\lambda_{2_g} + k\lambda_{3_g}, \\ \Lambda_g^{скор} &= \Lambda \circ \Lambda_g \end{aligned} \quad (25)$$

где  $\circ$  – символ, обозначающий операцию перемножения кватернионов.

При выполнении операции (25) следует пользоваться алгеброй кватернионов. Т.е. скорректированный кватернион будет иметь вид

$$\Lambda_g^{скор} = 1\lambda_{0_g}^{скор} + i\lambda_{1_g}^{скор} + j\lambda_{2_g}^{скор} + k\lambda_{3_g}^{скор}, \quad (26)$$

где  $\lambda_{0_g}^{скор} = \lambda_0\lambda_{0_g} - \lambda_1\lambda_{1_g} - \lambda_2\lambda_{2_g} - \lambda_3\lambda_{3_g}$ ,

$$\lambda_{1_g}^{скор} = \lambda_0\lambda_{1_g} + \lambda_1\lambda_{0_g} + \lambda_2\lambda_{3_g} - \lambda_3\lambda_{2_g}, \quad (27)$$

$$\lambda_{2_g}^{скор} = \lambda_0\lambda_{2_g} + \lambda_2\lambda_{0_g} + \lambda_3\lambda_{1_g} - \lambda_1\lambda_{3_g},$$

$$\lambda_{3_g}^{скор} = \lambda_0\lambda_{3_g} + \lambda_3\lambda_{0_g} + \lambda_1\lambda_{2_g} - \lambda_2\lambda_{1_g}.$$

Т.о. использование выражения (26) позволяет скорректировать показания БИНС по параметрам ориентации, при приеме сигналов с одной антенны СНС.

Анализ четырех представленных вариантов показал, что на борту МЛА целесообразней использовать либо 3-й, либо 4-й вариант, т.к. они имеют однозначное решение и для их реализации не требуются значительные вычислитель-

ные ресурсы. При этом если алгоритм работы БИНС построен на направляющих косинусах то использовать выражение (22), а если на параметрах Родрига-Гамильтона – то выражение (26).

## Литература

1. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС / В.А. Болдин [и др.]. Изд. 2-е. М.: ИПРЖР. 1999.
2. Сетевые спутниковые радионавигационные системы. Под. ред. В.С. Шебшаевича. М.: Радио и связь, 1993.
3. Степанов О.А. Особенности построения и перспективы развития навигационных инерциально-спутниковых систем // Интегрированные инерциально-спутниковые системы навигации: сб. статей и докладов. СПб.: ГНЦ РФ-ЦНИИ «Электроприбор», 2001.
4. Соловьев Ю.А. Системы спутниковой навигации. М.: КТЦ-«Эко-Трендз», 2000.
5. Степанов О.А., Кошаев Д.А. Исследование методов решения задачи ориентации с использованием спутниковых систем // Гироскопия и навигация, 1999. №2. С.30-55.
6. Использование системы NAVSTAR для определения угловой ориентации объектов / В.Н. Абросимов [и др.] // Зарубежная радиоэлектроника, 1989. №2. С.46-53.
7. Анучин О.Н., Емельянцева Г.И. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов. Под общей редакцией В.Г. Пешехонова. Изд. 2-е. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2003.
8. Немов А.В., Кирсанов И.Ю. Система измерений пространственной ориентации летательных аппаратов по сигналам спутниковых радионавигационных систем // Датчики и системы, 2003. №2. С.25-29.
9. Пат. РФ № 2105319 Российская Федерация, МПК7 G 01 S 5/00. Способ угловой ориентации объектов по сигналам космических аппаратов глобальных навигационных спутниковых систем / Фатеев Ю.А., Чмых М.К. - №95115922/09; заявл. 13.09.95; опубл. 20.02.98. Бюл. №16. 6 с.: ил.
10. Серегин В.В., Ющенко В.И. Алгоритмы обработки информации, получаемой многоантенной аппаратурой потребителей GPS // Гироскопия и навигация, 1999. №3. С.93-100.
11. Серегин В.В., Кирст М.А., Ющенко В.И. Определение угловой ориентации объекта по информации о скорости его движения в средах «ГЛОНАСС» и «НАВСТАР» // Известия вузов. Приборостроение, 1997. Т.40. №4. С.38-42.
12. Серегин В.В., Кирст М.А., Ющенко В.И. Определение угловой ориентации объекта по доплеровским сдвигам частот сигналов

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

ГЛОНАСС и NAVSTAR // Гироскопия и навигация, 1996. №4. С. 62-63.

13. Прохорцов А.В., Блинов В.В., Богданов М.Б., Савельев В.В., Сухинин Б.В. Способ определения угловой ориентации объекта. Пат. 2248004 РФ, МКИ 7 G 01 S 5/00. Оpubл. 10.03.2005. Бюл. №7. Приоритет 30.04.2003.

14. Прохорцов А.В., Богданов М.Б., Савельев В.В. Способ определения угловой ориентации объекта (патент) Пат. 2276384 РФ, МПК G 01 S 5/00. Оpubл. 10.05.2006. Бюл. №13. Приоритет 27.04.2004.

15. Прохорцов А.В., Богданов М.Б., Савельев В.В., Сухинин Б.В. Способ определения угловой ориентации объекта (патент) Пат. 2364884 РФ, МПК G 01 S 5/00. Оpubл. 20.08.2009. Бюл. №23. Приоритет 11.12.2006.

16. Прохорцов А.В., Богданов М.Б., Савельев В.В., Власов А.Ю., Данилов М.Б. Способ определения угловой ориентации объекта (патент). Пат. 2414685 РФ, МПК G 01 S 21/06. Оpubл. 20.03.2011. Бюл. №8. Приоритет 25.02.2010.

17. Прохорцов А.В., Богданов М.Б., Савельев В.В., Смирнов В.А., Чепурин А.А. Способ определения угловой ориентации объекта (патент). Пат. 2422844 РФ, МПК G 01 S 5/00. Оpubл. 27.06.2011. Бюл. №18. Приоритет 11.01.2009.

18. Прохорцов А.В., Богданов М.Б., Савельев В.В., Сухинин Б.В. Метод определения параметров ориентации с помощью СНС, основанный на измерении координат трех его точек // Известия Тульского государственного университета. Серия «Проблемы специального машиностроения». Вып. 9. Ч.1. Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. С. 309-312.

19. Прохорцов А.В., Богданов М.Б., Савельев

В.В. Метод определения параметров ориентации с помощью СНС // Известия Тульского государственного университета. Серия «Проблемы специального машиностроения». Вып. 9. Ч.1. Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. С. 313-317.

20. Прохорцов А.В., Богданов М.Б., Савельев В.В., Сухинин Б.В., Интерферометрический метод определения параметров ориентации ЛА // Полет, 2007. №11. С. 45-47

21. Богданов М.Б., Прохорцов А.В., Савельев В.В., Смирнов В.А. Способ коррекции показаний БИНС по параметрам ориентации при приеме сигналов от одного навигационного спутника // Известия Института инженерной физики, 2012. №1 (23). С. 70-73.

22. Prohortsov A.V., Savelyev V.V., Smirnov V.A. A method of orientation data correction of a strapdown inertial navigation system by signals received from one satellite navigation system antenna. 19-th Saint Petersburg international conference on integrated navigation systems 28 may-30 may 2012. Saint Petersburg, Russia. p.232 -234.

23. Прохорцов А.В. Методы определения параметров ориентации подвижных объектов по сигналам спутниковых радионавигационных систем // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 1. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. С. 258 -267.

24. Прохорцов А.В. О возможности определения параметров угловой ориентации по сигналам одной антенны СНС // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 11. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. С. 74-79.

25. Прохорцов А.В. Способы определения параметров ориентации с помощью спутниковых навигационных систем. Монография. Тула: Изд. ТулГУ, 2013. 80 с.

УДК 623.454.8

## МЕТОДИКА ПРИМЕНЕНИЯ СПОСОБОВ ОДНОПУНКТНОЙ ДАЛЬНОМЕТРИИ ПРИ ОЦЕНКЕ ИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ

## TECHNIQUE OF USING METHODS OF SINGLE-POINT RANGE-FINDING IN THE ESTIMATION OF THEIR ERRORS

**Дмитрий Николаевич Глазов**

преподаватель  
филиал ВА РВСН имени Петра  
Великого (г. Серпухов)  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, ул. Бригадная д. 17  
Тел.: 8(903)530-69-48  
E-mail: privokzalniy@yandex.ru



### Аннотация

Статья посвящена вопросам оценки погрешностей одноточечных способов дальнометрии. Выбирается способ оптимального ведения однопунктной радиодальнометрии.

Ключевые слова: радиодальнометрия, однопунктная радиотехническая система, способ, ионосфера, среднеквадратическая ошибка.

### Summary

The article is devoted to the evaluation of errors of single-point methods of distance measurement. Selects the method of optimal management of topochnoj radiotelemetry.

**Keywords:** radiotelemetry, odnopolnaja radio system, method, ionosphere, standard error.

В ракетных войсках стратегического назначения актуальной задачей является обеспечение штабов объединений и соединений информацией о параметрах ядерных взрывов (ЯВ).

Решение этих вопросов возможно с помощью однопунктных радиотехнических систем местоопределения ЯВ. Однако, трудности в их реализации, обусловлены большими ошибками в определении координат эпицентров ЯВ на дальностях более 50-100 км. Точность определения координат эпицентров ЯВ зависит от точности определения пеленга на излучатель и дальности до него. В данной работе рассмотрены вопросы повышения точности дальнометрии ЯВ в зоне контроля, ограниченной радиусом 1000 км.

Из способов дальнометрии, наиболее перспективными являются те, которые основаны на использовании геометрооптической модели распространения радиоволн ОНЧ диапазона в волноводе «Земля-ионосфера» [1, 2, 3]. Для определения путей повышения точности дальнометрии, проведем анализ существующих способов

определения дальности до излучателя.

### 1. Способ дальнометрии, основанный на измерении временных задержек ионосферных волн и данных о кажущейся высоте их отражения от ионосферы.

Расстояние до излучателя определяется по выражению

$$R = 2nR_n - \Delta t_n c, \quad (1)$$

где  $R$  – дальность до излучателя;

$c$  – скорость распространения радиоволн;

$n$  – число отражений принятой волны;

$R_n$  – длина оптического плеча от точки излучения до первого отражения от ионосферы, определяющаяся по выражению

$$R_n = \sqrt{2R_\oplus(R_\oplus + h)(1 - \cos(R/2nR_\oplus))} + h^2, \quad (2)$$

где  $R_\oplus$  – радиус Земли;

$h$  – кажущаяся высота отражения волн от ионосферы.

## 2. Способ дальнометрии, основанный на измерении временных задержек и углов падения ионосферных волн в вертикальной плоскости.

Для данного способа, расстояние до излучателя определяется по выражению

$$R = \frac{2nR_c \sin(R/2nR_c)}{\sin(\varphi_n - R/2nR_c)}, \quad (3)$$

где  $\varphi_n$  – угол падения ионосферной волны.

## 3. Способ дальнометрии, основанный на определении углов падения ионосферных волн в вертикальной плоскости и использование данных о кажущейся высоте отражения радиоволн от ионосферы.

В этом способе, расстояние до источника электромагнитного сигнала, будет определяться согласно выражения

$$R = 2nR_c \left[ \varphi_n - \arcsin\left(\frac{R_c \sin(\varphi_n)}{R_c + h}\right) \right], \quad (4)$$

где физический смысл величин указан выше.

Оценку точностных характеристик способа дальнометрии, основанного на измерении временных задержек ионосферных волн, ошибок в определении угла падения и данных о кажущейся высоте их отражения от ионосферы, можно провести с помощью метода статистических испытаний (МСИ) или метода Монте-Карло.

Изменяя параметры, входящие в выражения (1–4), случайным образом с заданными среднеквадратическими ошибками (СКО), и решая указанные выше уравнения относительно дальности, можно получить массив случайных значений дальности до источника излучения. Статистическая обработка этого массива позволяет найти математическое ожидание и СКО в определении дальности до излучателя.

Данный метод проведения статистических испытаний был реализован с помощью прикладного программного обеспечения MATLAB. В результате, написана программа, которая по входным значениям параметров, входящих в выражения (1–4) и их СКО, дает среднеквадратическую ошибку определения расстояния до излучателя. В *таблице 1* представлены данные по СКО параметров, входящих в выражения (1–4).

Таблица 1

	СКО в определении временных задержек $\sigma_{\Delta t}$ , мкс	СКО в определении углов падения $\sigma_{\varphi_n}$ , град	СКО в определении кажущейся высоты $\sigma_h$ , км
значения СКО	0.25	0.5	0.5

На *рисунке 1* представлена зависимость СКО

от расстояния для дневной ионосферы ( $h=65$  км) при различных способах определения дальности и выбора номера ионосферной волны:

1, 2, 4 линии – способ, рассмотренный в пункте 2 для 1, 2 и 3 ионосферной волны соответственно.

3, 5, 7 линии – способ, рассмотренный в пункте 3 для 1, 2 и 3 ионосферной волны соответственно.

6, 8, 9 линии – способ, рассмотренный в пункте 1 для 1, 2, и 3 ионосферной волны соответственно.

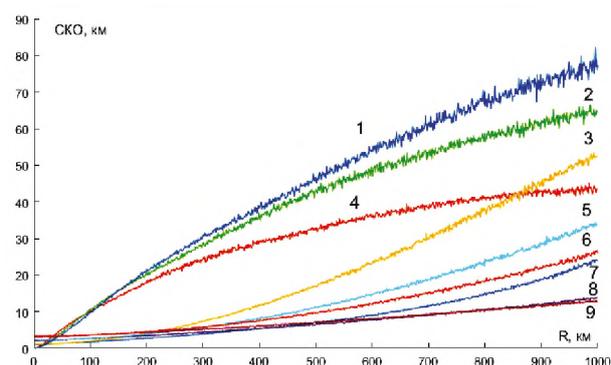


Рис. 1. График зависимости СКО от расстояния для дневной ионосферы

На *рисунке 2* представлена зависимость СКО от расстояния для ночной ионосферы ( $h=90$  км) при различных способах определения дальности и выбора номера ионосферной волны:

1, 2, 4 способ, рассмотренный в пункте 2 для 1, 2 и 3 ионосферной волны соответственно.

3, 6, 7 способ, рассмотренный в пункте 3 для 1, 2 и 3 ионосферной волны соответственно.

5, 8, 9 способ, рассмотренный в пункте 1 для 1, 2, и 3 ионосферной волны соответственно.

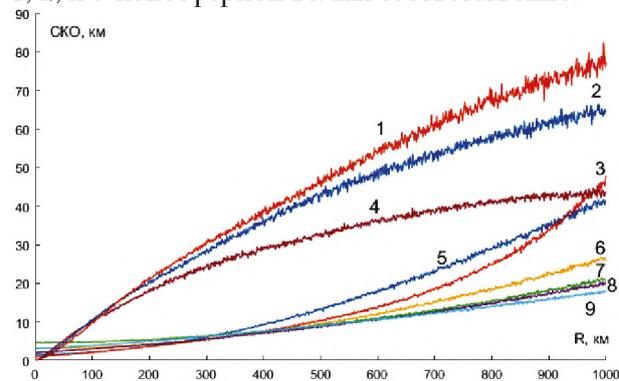


Рис. 2. График зависимости СКО от расстояния для ночной ионосферы

Анализ графиков на *рисунках 1* и *2* показывает, что для уменьшения СКО, в зависимости от дальности до источника излучения нужно использовать различные способы определения

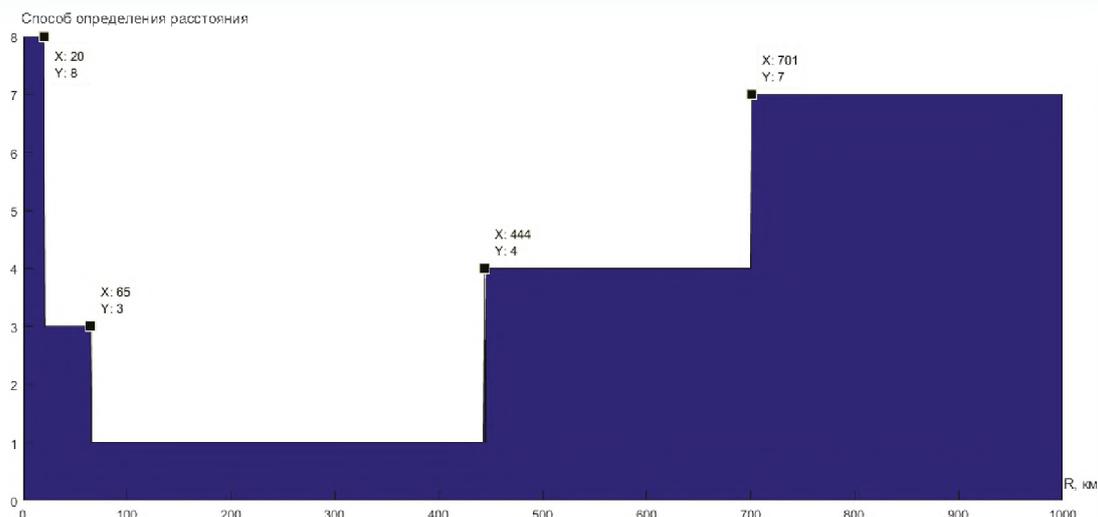


Рис. 3. График выбора способа определения расстояния в зависимости от дальности для дневной ионосферы

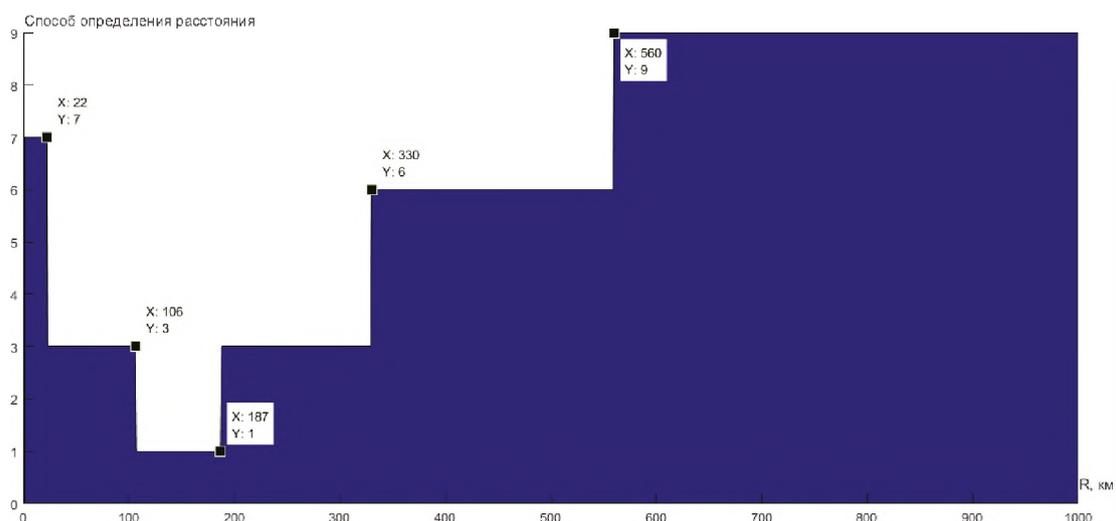


Рис. 4. График выбора способа определения расстояния в зависимости от дальности для ночной ионосферы

расстояния. Результаты анализа представлены на *рисунке 3* для дневной и *рисунке 4* для ночной ионосферы.

Значение ординат на рисунках 3 и 4:

- 1 способ, рассмотренный в пункте 1 для 1 ионосферной волны;
- 2 способ, рассмотренный в пункте 3 для 1 ионосферной волны;
- 3 способ, рассмотренный в пункте 2 для 1 ионосферной волны;
- 4 способ, рассмотренный в пункте 1 для 2 ионосферной волны;
- 5 способ, рассмотренный в пункте 3 для 2 ионосферной волны;
- 6 способ, рассмотренный в пункте 2 для 2 ионосферной волны;
- 7 способ, рассмотренный в пункте 1 для 3 ио-

носферной волны;

8 способ, рассмотренный в пункте 3 для 3 ионосферной волны;

9 способ, рассмотренный в пункте 2 для 3 ионосферной волны.

### Литература

1. Шевченко В.П. Радиотехнический метод обнаружения ядерных взрывов. Ч.1. Серпухов: МО СССР, 2015. 100 с.
2. Вопросы обнаружения сигналов в диапазоне ОНЧ / Сб.трудов ИРЭ АН СССР под ред. Ю.Б. Кобзарева. Выпуск 4. М.: АН СССР, 1979.
3. Krider E. Philip, Noggie Carl R., Uman Martin A. A gated wideband magnetic direction finder for lightning return strokes // J. Appl Meteorol, 1976, 15. №3, pp. 301-306.

## РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ



УДК 621.396

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОСТУПНОСТИ ГЛОБАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВАРИРУЕМОГО УГЛА РАДИОВИДИМОСТИ НАВИГАЦИОННЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

### FORECASTING THE AVAILABILITY OF THE GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM DEPENDING ON THE VARYING RADAR VISIBILITY ANGLE OF THE NAVIGATION SPACECRAFT

#### Денис Владимирович Сальников

кандидат технических наук  
старший преподаватель  
ФГКВОУ Военная академия связи имени  
Маршала Советского Союза С. М. Буденного  
Адрес: 194064, Санкт-Петербург,  
Тихорецкий проспект, д. 3  
Тел.: 8(911)236-16-59  
E-mail: denis\_salnikov@mail.ru

#### Илья Сергеевич Мешков

адъюнкт  
ФГКВОУ Военная академия связи имени  
Маршала Советского Союза С. М. Буденного  
Адрес: 194064, Санкт-Петербург,  
Тихорецкий проспект, д. 3  
Тел.: 8(981)877-05-54  
E-mail: ilya.meshkov.1987@mail.ru

#### Иван Сергеевич Климов

курсант  
ФГКВОУ Военная академия связи имени  
Маршала Советского Союза С. М. Буденного  
Адрес: 194064, Санкт-Петербург,  
Тихорецкий проспект, д. 3  
Тел.: 8(981)881-80-15  
E-mail: kuroyoru@mail.ru

#### Аннотация

На сегодняшний день не в полной мере исследованы методы прогнозирования доступности глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Актуальность работы обусловлена потребностями в обеспечении точными координатами местоположения наземного подвижного объекта в условиях воздействия дестабилизирующих факторов. В статье предложен вариант прогнозирования доступности ГНСС при соблюдении заданной точности. Авторами данной работы разработаны программы, позволяющие рассчитать доступность ГНСС в зависимости от варьируемого угла радиовидимости навигационных космических аппаратов (НКА). В статье приведены результаты расчета доступности ГНСС по пространству, проанализированы формы площадей земной поверхности на которых обеспечиваются различные значения требований по точности определения местоположения, проведен анализ доступности ГНСС в зависимости от варьируемого угла радиовидимости НКА.

**Ключевые слова:** глобальная навигационная спутниковая система, ГЛОНАСС, GPS, Galileo, доступность местоопределения по пространству, угол радиовидимости навигационных космических аппаратов, требуемая точность определения местоположения, геометрический фактор, навигационно-временные определения.

#### Summary

To date, methods for predicting the availability of global navigation satellite systems (GNSS) have not been fully explored. The urgency of the work is due to the need to provide the exact coordinates of the location of a land mobile object in the context of destabilizing factors. The article proposes a variant of forecasting the availability of GNSS, while observing the specified accuracy. The authors of this work have developed programs that allow to calculate the availability of GNSS depending on the varying angle of radio visibility of navigational satellite (NS). The results of GNSS space availability calculation are analyzed in the article, the forms of the Earth surface areas are analyzed on which different values of the location accuracy requirements are provided, and the availability of GNSS is analyzed depending on the variable angle of the radio visibility of the NS.

**Keywords:** global navigation satellite system, GLONASS, GPS, Galileo, availability of positioning by space, viewing angle of navigation satellite, required accuracy of position determination, geometric factor, navigation-time determinations.

Тактика современного боя требует от командира достаточно высокой оперативности принятия решения по применению вверенных ему подразделений. Развернутые глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) ГЛОНАСС, *GPS*, навигационная аппаратура потребителя (НАП) и разработанное в настоящий момент программное обеспечение позволяет командиру оперативно контролировать положение починенных частей и подразделений в ходе выполнения ими поставленных задач. Это достигается путем обеспечения командира данными о местоположении своих, приданных подразделений и соседей. В ходе боя командир имеет возможность видеть положение и траектории движения подразделений, отображаемых на автоматизированном рабочем месте с требуемой степенью детализации.

Актуальность работы обусловлена потребностями в обеспечении точными координатами местоположения наземного подвижного объекта в условиях воздействия дестабилизирующих факторов. Проведенное авторами практическое исследование потребительских характеристик, предоставляемых НАП военного назначения при проведении марша по среднeperесеченной местности Ленинградской области выявило сильное негативное влияние топологии окружающей местности на качество решения навигационной задачи. Погрешность навигационно-временных определений (НВО) снижалась до 300 метров, а эпизодически решения и вовсе не было.

В статье приведены результаты прогнозирования доступности ГНСС ГЛОНАСС, *GPS*, *Galileo* при соблюдении заданной точности решения навигационной задачи. Предтеча данного исследования приведена в [6, 7].

Критерий оценки обеспечения НВО ГНСС с заданным качеством – доступность ГНСС (эксплуатационная готовность ГНСС). Под доступностью (*Service Availability*) понимается готовность ГНСС предоставить потребителям проведение навигационных определений с требуемыми точностными характеристиками (выражается в процентах времени, в течении которого обеспечиваются заданные условия) [1]. Задача определения координат местоположения (МП) по сигналам ГНСС решается в НАП.

В соответствии с [2] имеем: точность – степень соответствия расчетного или измеренного значения истинному значению. Точность измерения МП, как правило, выражается расстоянием от заявленного МП, в пределах которого, как установлено с определенной степенью вероятности, находится истинное МП. Таким образом, харак-

теристика точности МП, в соответствии с данным определением – радиус сферы или круга  $r$ .

Вероятность попадания случайной точки в сферу (круг на плоскости) при условии, что погрешности ее линейных прямоугольных координат имеют нормальное распределение с математическим ожиданием равным 0, и равными среднеквадратическими погрешностями (СКП) определяется известным соотношением:

$$p(r) = 1 - e^{-\frac{r^2}{2\sigma_{мп}^2}} \quad (1)$$

где  $r$  – радиус (сферы) круга;

$p(r)$  – установленная вероятность;

$\sigma_{мп}$  – СКП определения МП.

В случае некоррелированных и одинаковых по точности измерений радионавигационных параметров:

$$\sigma_{мп} = \sigma_{нд} \cdot K_g, \quad (2)$$

где  $\sigma_{нд}$  – СКП определения псевдодальностей (ПД) в НАП;

$K_g$  – коэффициент геометрии [3, 4].

Коэффициент геометрии (геометрический фактор) – мера уменьшения точности навигационных определений в ГНСС из-за особенностей пространственного расположения навигационных космических аппаратов (НКА) и потребителя (в иностранной литературе имеет обозначение *GDOP*). Общее математическое решение расчета коэффициента геометрии представлено в [3]. Необходимо заметить, что *GDOP* состоит из ряда слагаемых, которые учитывают различные меры уменьшения точности НВО в ГНСС из-за особенностей пространственного расположения НКА и потребителя: пространственный – *PDOP*, горизонтальный – *HDOP*, вертикальный – *VDOP*, временной – *TDOP*.

Различные потребители ГНСС для решения своих задач по предназначению выдвигают свои требования по обеспечению доступности проведения НВО только в горизонтальной или в вертикальной плоскостях или полностью в трехмерном пространстве. В соответствии с данными требованиями [5] классифицирует доступность на: доступность местоопределения по пространству (*PSA – Positional Service Availability*); по горизонтали (*HSA – Horizontal Service Availability*); по вертикали (*VSA – Vertical Service Availability*).

**Доступность местоопределения по пространству *PSA* (*Positional Service Availability*)** – процент времени на любом 24-часовом интервале, в течении которого с 95%-ной вероятностью погрешность местоопределения по пространству меньше порогового значения для любой точки рабочей зоны системы [5].

Опираясь на выше изложенный теорети-

ческий материал, авторы данной статьи разработали методику оценки доступности ГНСС [6]. Центральная часть методики – расчет положения НКА ГНСС по альманаху текущего созвездия НКА в заданные моменты времени на интересующем интервале  $t_{\text{модель}} = n \cdot \Delta t$ . Расчет коэффициента геометрии производится в моменты времени  $n \cdot \Delta t$  для указанного (требуемого) места (зоны) расположения НАП [7]. Приняв во внимание бюджет погрешностей  $\sigma_{\text{нб}} = 6,2 \text{ м}$  [8], задавшись требуемой точностью измерения местоположения  $r$  представляется возможным провести прогнозирование доступности ГНСС с учетом (1) и (2).

Поясним расчет  $PSA$ , производимый по формуле (3). Для каждого момента времени  $n \cdot \Delta t$ ,  $n \in (1, 2, \dots, K)$  производится проверка выполнения условия  $p(r_p) \geq 0,95$ . Если условие выполняется, то коэффициент  $C_n = 1$ , иначе  $C_n = 0$ .

$$PSA = \frac{\sum_{n=1}^K C_n}{K} \cdot 100\%, \begin{cases} \text{если } p(r_p) \geq 0,95, C_n = 1 \\ \text{если } p(r_p) < 0,95, C_n = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Рассмотрим результаты расчетов, полученные при следующих ограничениях: форма Земли – эллипсоид вращения [9], отсутствует воздействие помех естественного и искусственного происхождения. Моделируемая дата 20.05.2017 г., время моделирования  $\Delta t_{\text{модель}} = 24$  часа с шагом  $\Delta t = 4'$ . Исследуемая зона Земной поверхности ( $\Delta B = 180^\circ$ ,  $\Delta L = 360^\circ$ )<sub>модель</sub>, представленная геодезическими координатами; высота над эллипсоидом вращения  $H = 50 \text{ м}$ ;  $\Delta B = \Delta L = 1^\circ$  – шаг перемещения по исследуемой зоне Земной поверхности (ЗП);  $\beta'_m = 5$  – угол маски (минимальный угол радиовидимости НКА для любой исследуемой точки ЗП). Требуемая точность (*Required Accuracy (RA)*) задавалась рядом значений 1, 5, 10 и далее с шагом 5 метров до 100 метров [10]. Согласно актуальным альманахам [11, 12, 13] на исследуемую дату в ГНСС было работоспособно: ГЛОНАСС – 24 НКА; *GPS* – 31 НКА; *Galileo* – гипотетически 27 НКА (резервные НКА – отключены).

Результаты расчетов для указанных ГНСС приведены в *таблицах 1-3*. Для ГНСС ГЛОНАСС, при ранее указанных исходных данных, минимальное пороговое значение обеспечиваемой точности НВО составляет 25 метров, однако доступность обеспечения данного требования наблюдается на 40% территории ЗП (*таблица 1*).

При занижении требований по точности НВО, доступность их обеспечения ГНСС ГЛОНАСС возрастает, так при  $r=50 \text{ м}$  и более можно утверждать о 95% доступности на всей ЗП

Для ГНСС *GPS*, при ранее указанных исходных данных, минимальное пороговое значение обеспечиваемой точности НВО составляет 20 метров, при занижении требований по точности НВО уже при  $r=40 \text{ м}$  и более можно утверждать о 95% доступности на всей территории ЗП (*таблица 2*).

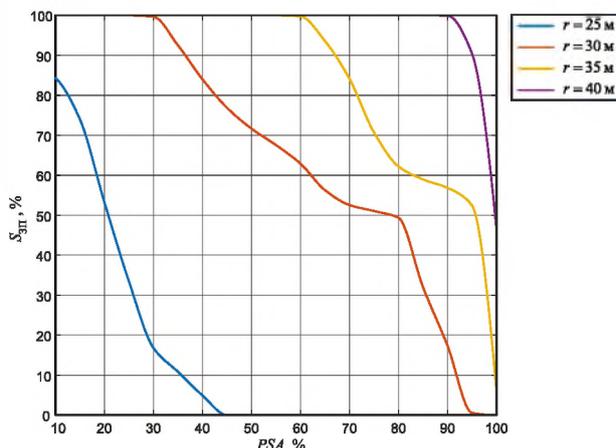


Рис. 1. Графическая интерпретация результатов таблицы 1

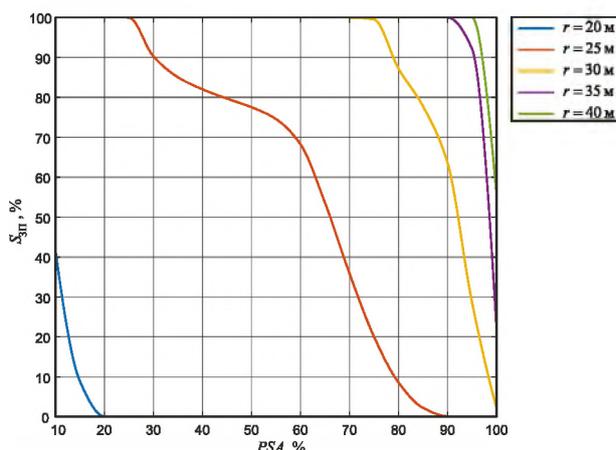


Рис. 2. Графическая интерпретация результатов таблицы 2

Для ГНСС *Galileo* минимальное пороговое значение обеспечиваемой точности НВО составляет 25 метров, при занижении требований по точности НВО уже при  $r=45 \text{ м}$  и более можно утверждать о 100% доступности на всей ЗП (*таблица 3*). Графическое представление результатов *таблиц 1-3* приведено на *рисунках 1-3* соответственно.

Иное представление результатов приведено на *рисунках 4-6*. Данные рисунки позволяют визуализировать форму ЗП на которой обеспечиваются требуемые числовые значения  $r$  и определить ее географическое положение на глобальной карте Земли. Заметно, что форма ЗП (*рисунок 4*), на которой обеспечиваются требуемые числовые значения  $r$ , обнаруживается и

# РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

**Таблица 1**

Площадь ЗП на которой выполняется *PSA* ГНСС ГЛОНАСС при заданной точности НВО

$S_{ЗП}, \%$		Требуемая доступность (PSA), %																			
		10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	
$R_A, \text{ м}$	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	25	84,3	74,1	53,3	33,5	16,8	10,8	4,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	30	100	100	100	100	99,7	92,5	84	76,9	71,7	67,6	62,9	56,3	52,6	51,1	49,4	32,1	17,4	0,6	0	
	35	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99,7	93,6	84,1	70,8	62,2	59	56,8	52,4	6,3	
	40	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99,9	90,5	46,7	
	45	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99,2	61,4
	50	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	80,7
	55	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	95,6
	60	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	98,1
	65	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	98,1
	70	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	98,2
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	98,2	

**Таблица 2**

Площадь геоида на которой выполняется *PSA* ГНСС *GPS* при заданной точности НВО

$S_{ЗП}, \%$		Требуемая доступность (PSA), %																			
		10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	
$R_A, \text{ м}$	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	20	41,9	9	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	25	100	100	100	100	90,3	85,1	82	79,7	77,6	74,6	68,3	53,7	36	20,1	8,6	2,2	0,1	0	0	
	30	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99,5	87,2	77,8	63,7	28,7	2,3	
	35	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	92,2	22,5	
	40	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	56
	45	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	72,1
	50	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	79,5
	55	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	86,4
	60	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	95,6
	65	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99,7
70	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	

**Таблица 3**

Площадь геоида на которой выполняется *PSA* ГНСС *Galileo* при заданной точности НВО

$S_{ЗП}, \%$		Требуемая доступность (PSA), %																		
		10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
$R_A, \text{ м}$	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	25	100	100	100	100	100	100	88,6	69,5	53,1	45,3	25,7	19,1	5,1	0,7	0	0	0	0	0
	30	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	97,2	84,8	61,4	40	16,1	2,6
	35	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	91,6	79,5	60,8	21,7
	40	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	85,7	62,2
	45	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

расширяется с полюсов Земли при увеличении  $r$ .

На *рисунке 5* представлен результат расчета доступности местоопределения наземного потребителя ГНСС *GPS*. Результаты несколько разнятся в сравнении с ГНСС ГЛОНАСС (*рисунком 4*).

Отличительная особенность формы ЗП, на которой обеспечиваются требуемые числовые значения  $r$  (при их уменьшении с 40 м) для ГНСС *GPS* – ее меридиональное сужение к экваториальной области.

*Рисунок 6* иллюстрирует результаты расчета

# РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

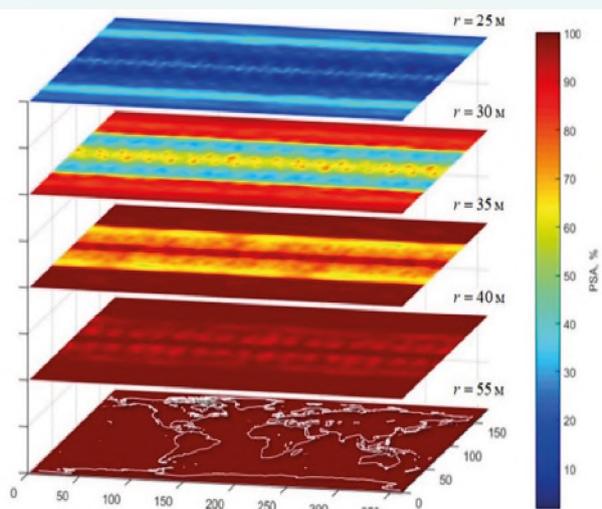


Рис. 4. Доступность ГНСС ГЛОНАСС по пространству

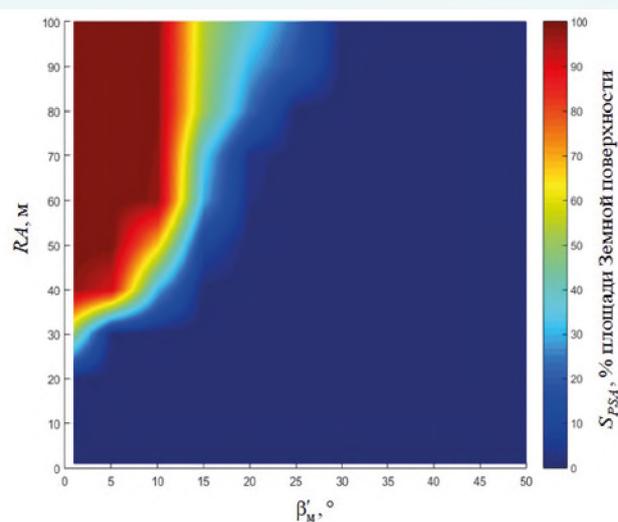


Рис. 7. Площадь ЗП для которой  $PSA \geq 95\%$  ГНСС ГЛОНАСС

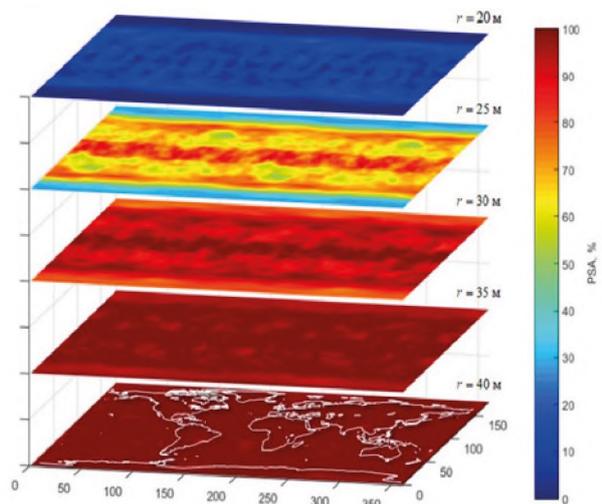


Рис. 5. Доступность ГНСС GPS по пространству

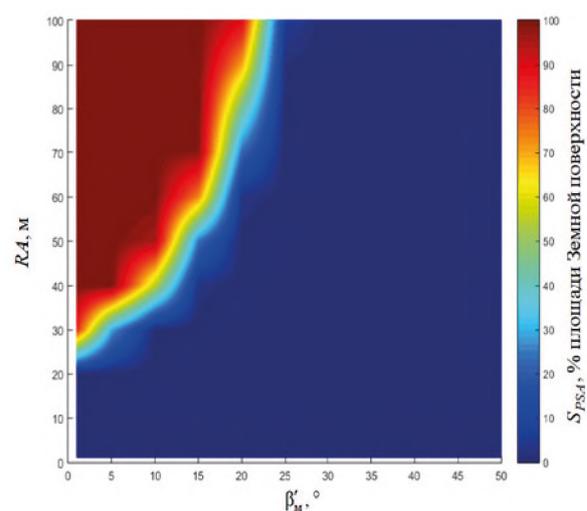


Рис. 8. Площадь ЗП для которой  $PSA \geq 95\%$  ГНСС GPS

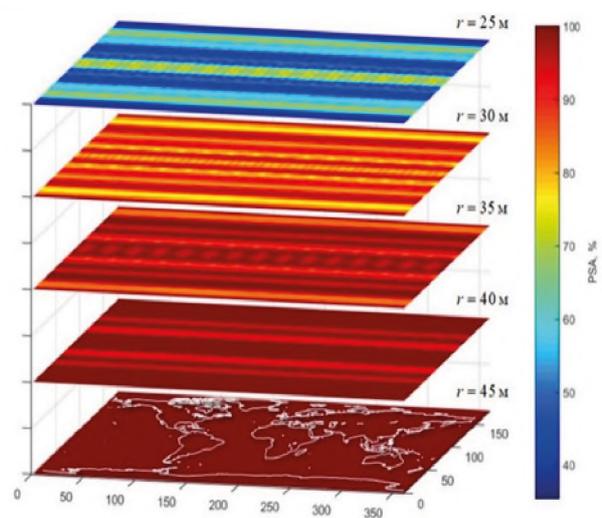


Рис. 6. Доступность ГНСС Galileo по пространству

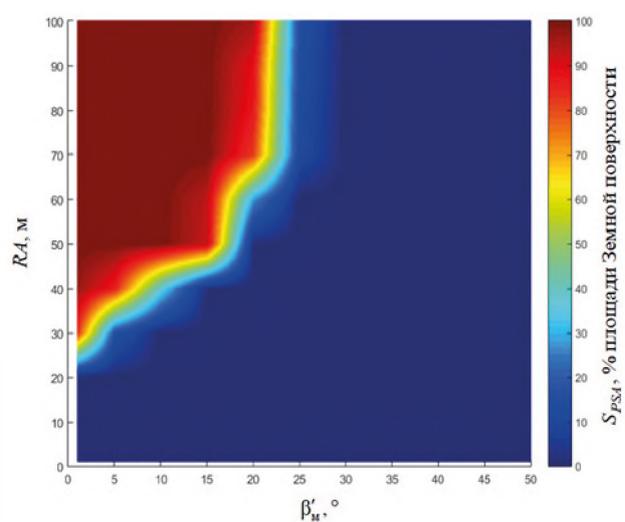


Рис. 9. Площадь ЗП для которой  $PSA \geq 95\%$  ГНСС Galileo

доступности местоопределения наземного потребителя ГНСС Galileo. При уменьшении  $r$  с 45 метров форма ЗП на которой обеспечиваются условия выполнения заданных требований уменьшается со 100% и представляет собой меридиональные полосы в экваториальной области и на средних широтах северного и южного полушарий ЗП.

Рисунки 7-9 иллюстрируют результаты расчетов, имитирующих в первом приближении влияние топологии окружающей местности на качество НВО. Влияние топологии местности задавалось вариативными значениями  $\beta^m$ . Требование по доступности –  $PSA \geq 95\%$ , выбрано по аналогии с требуемой 95% надежностью обеспечения радиорелейной связи специально назначения.

На рисунках 7-9 отчетливо наблюдается гребень в убывании площади ЗП на которой соблюдается  $PSA \geq 95\%$  при одновременном увеличении  $\beta^m$  и  $RA$ . Форма гребня изменяется по параболическому закону.

Для гребня на рисунке 7 наблюдаем несколько меньшее значение фокального параметра чем для рисунков 8 и 9. В свою очередь – гребни (рисунки 8, 9) очень схожи. Для сравнения зададимся 50% площади ЗП для которой  $PSA \geq 95\%$  (изумрудный цвет на рисунках 7-9). Заданные параметры обеспечиваются при  $\beta^m = 1$  и  $RA = 30$  м (рисунк 7),  $RA = 26$  м (рисунки 8, 9) – левая оконечность гребня; для правой оконечности гребня имеем –  $RA = 100$  м при  $\beta^m = 16,2$  (рисунк 7),  $\beta^m = 22,3$  (рисунк 8) и  $\beta^m = 22,8$  (рисунк 9).

Анализ по рисункам 7-9 влияния топологии местности на качество решения НВО и доступности  $PSA$  свидетельствует о временном превосходстве ГНСС GPS над ГЛОНАСС [14]. Развертываемая ГНСС Galileo в проектном исполнении также несколько превосходит Российскую ГНСС по анализируемым в статье характеристикам.

В статье приведены результаты расчета доступности ГНСС по пространству, проанализированы формы площадей ЗП на которых обеспечиваются различные значения требований по точности определения местоположения, проведен анализ доступности ГНСС в зависимости от варьируемого угла радиовидимости НКА. Можно сделать вывод, что площадь ЗП на которой обеспечивается доступность ГНСС напрямую зависит от угла радиовидимости НКА и требуемой точности определения местоположения.

## Литература

1. ГОСТ Р 52928 – 2010. Национальный стандарт Российской Федерации Система спутниковая навигационная глобальная. Взамен ГОСТ 52928 – 2008, Введ. 09.11.10. М.: Стандартинформ, 2011. 16 с.

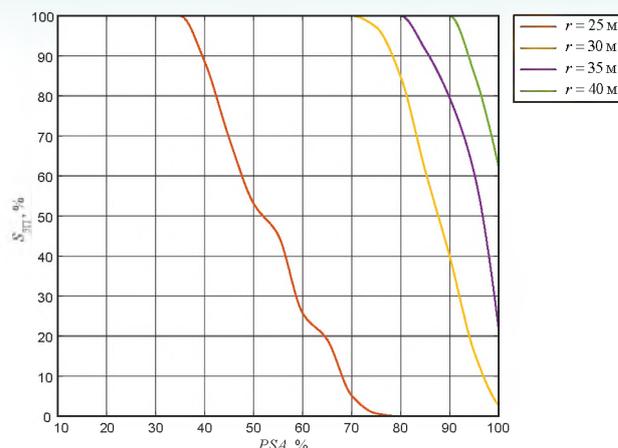


Рис. 3. Графическая интерпретация результатов таблицы 3

2. Методические рекомендации по проведению геодезической съемки АНО на гражданских аэродромах и воздушных трассах России. Приложение к распоряжению Минтранса России от 4 апреля 2003 г. № КР-14-р.

3. Перов А.И., Харисов В.Н. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.

4. Яценков В.С. Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС. М.: Горячая линия-Телеком, 2005. 272 с.

5. ГОСТ 52865 – 2009 Национальный стандарт Российской Федерации Параметры радионавигационного поля. Взамен ГОСТ 52865 – 2007, Введ. 15.12.09. М.: Стандартинформ, 2010. 17 с.

6. Сальников Д.В., Мешков И.С. Методика оценки доступности глобальной навигационной спутниковой системы в условиях воздействия дестабилизирующих факторов // Известия Института инженерной физики, 2017. №4(46). С. 22-25.

7. Сальников Д.В., Мешков И.С., Долгая А.А. Оценка интегральной доступности глобальной навигационной спутниковой системы // Известия Института инженерной физики, 2018. №1(47). С. 32-38.

8. Перов А. И. Основы построения спутниковых радионавигационных систем. М.: Радиотехника, 2012. 240 с.

9. ГОСТ Р 51794-2008 Глобальные навигационные спутниковые системы. Системы координат. Методы преобразования координат определяемых точек. Взамен ГОСТ 51794 – 2001, введ. 18.12.08. М.: Стандартинформ, 2009. 19 с.

10. ГОСТ РВ 5819-109-2007 «ОАЦСС ВС РФ. Общие требования к системе навигационного обеспечения».

11. ftp://ftp.glonass-iac.ru/MCC/ALMANAC 12.03.2018 г.

12. http://www.navcen.uscg.gov/?pageName=gpsAlmanacs 12.03.2018 г.

13. https://www.gsc-europa.eu/electronic-library/programme-reference-documents/12.03.2018 г.

14. https://iz.ru/713591/dmitrii-strugovetc-nikolai-krasnov/tochnost-glonass-povysiat-v-tri-raza 12.03.2018 г.



УДК 621.394

## КАСКАДНОЕ КОДИРОВАНИЕ ДАННЫХ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ОРТОГОНАЛЬНЫМИ ВНУТРЕННИМИ КОДАМИ

## CASCADING DATA ENCRYPTION WITH PARALLEL ORTHOGONAL INTERNAL CODES

**Юрий Владимирович Зеленецкий**

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

**Евгений Валерьевич Шмырин**

*кандидат технических наук*  
научный сотрудник  
МОУ «ИИФ»  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7(4967)35-31-93  
E-mail: shmyrinev@mail.ru

**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

**Анатолий Владимирович Зеленецкий**

*кандидат технических наук*  
заместитель начальника отдела  
ЗАО «Фирма НТЦ «КАМИ»  
Адрес: 125480, Москва,  
ул. Героев Панфиловцев, д. 10  
Тел.: 8(926)150-83-76  
E-mail: dieselmail@inbox.ru

**Артем Сергеевич Дурнов**

научный сотрудник  
войсковая часть 33965  
Адрес: 117602, Москва,  
Мичуринский проспект, д. 70  
Тел.: 8(985)385-78-74  
E-mail: tema070@mail.ru

### Аннотация

В статье предложена новая структурная схема формирования каскадного кода, которая, в отличие от известных, содержит внутренний кодер с параллельной передачей ортогональных кодовых последовательностей, внутренний декодер с корреляционным декодированием ортогональных кодовых последовательностей (декодирование по максимуму правдоподобия) и позволяет повысить помехоустойчивость каскадного кода до предельных границ К.Шеннона, не прибегая к расширению требуемой полосы пропускания.

**Ключевые слова:** каскадное кодирование данных, ортогональные последовательности Уолша-Адамара, коэффициент взаимной корреляции, помехоустойчивость, вероятность ошибки декодирования символа, вероятность битовой ошибки.

### Summary

This paper proposes a new structural scheme for the formation of the cascade code, which, in contrast to the known, contains an internal encoder with parallel transmission in orthogonal code sequence, the inner decoder with correlation decoding of orthogonal code sequences (decoding by maximum likelihood) and to improve the noise immunity of the cascade code to the limit of the borders of C. Shannon, without resorting to the extension of the required bandwidth.

**Keywords:** cascading data encryption, orthogonal sequences, Walsh-Hadamard transform, coefficient of mutual correlation, noise immunity, error probability of decoding symbol, the probability of bit error.

Известные способы каскадного кодирования данных в качестве внешнего кода используют избыточные недвоичные коды Рида-Соломона, а в качестве внутреннего – избыточные двоичные (блочные или сверточные) коды [1,2,3]. При этом каждый символ недвоичного кода передается в канале передачи данных последовательностью двоичных символов. В таком варианте общая избыточность каскадного кода большая (иначе нельзя исправить пакеты ошибок большой длительности), и требуется каналы передачи с достаточной полосой пропускания.

Цель статьи – уменьшить избыточность каскадного кода (снизить требования к полосе пропускания канала передачи) и увеличить помехоустойчивость каскадного кода.

Для достижения поставленной цели в качестве внутреннего двоичного кода будем использовать ортогональные двоичные последовательности Уолша-Адамара и их кодовое уплотнение. В этом случае параллельный ортогональный код будет иметь длину  $n$ , число передаваемых информационных символов

$$k = \log_2 q = n,$$

где  $q$  – основание внешнего недвоичного кода Рида-Соломона.

Так как  $k=n$ , то внутренний код не имеет избыточности, а свойство ортогональности последовательностей Уолша-Адамара позволяет однозначно их идентифицировать на приемной стороне и декодировать по методу максимального правдоподобия (корреляционное декодирование).

Структурная схема системы передачи данных, реализующая такое каскадное кодирование, представлена на рисунке 1.

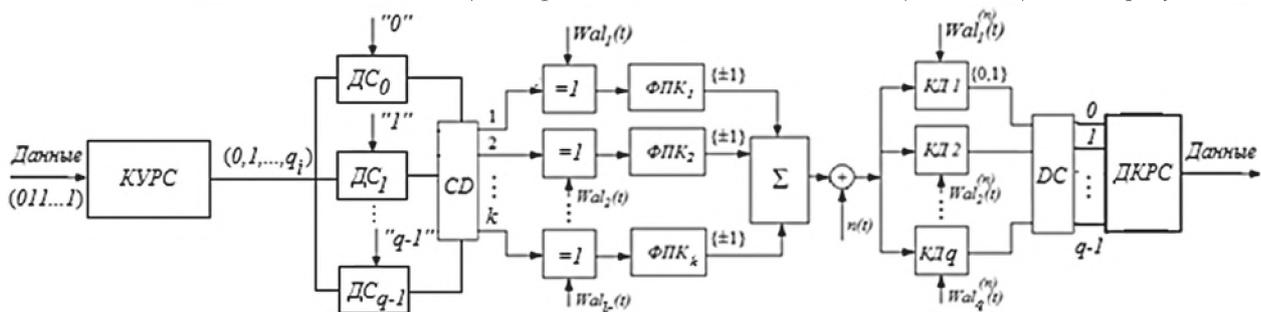
На передающей стороне данные (двоичные символы) поступают на вход кодирующего устройства (КУРС), которое формирует недвоичные символы  $\{q_i\}$  кода Рида-Соломона. Дешифраторы символов (ДС), используя известное представление символов  $q_i$  в виде двоичного кода, формируют на своих выходах унитарный сигнал только в том случае, если оба входных сигнала совпадают. Очевидно, унитарный

сигнал может существовать только на выходе одного из дешифраторов символов и возбуждать только один из входов шифратора (СД), на выходе которого будет формироваться параллельный двоичный  $k$ -разрядный код, однозначно соответствующий поступившему недвоичному символу кода Рида-Соломона. Двоичные символы с выходов СД поступают на первые входы сумматоров по модулю два ( $=1$ ), на вторые входы которых поступают ортогональные двоичные последовательности Уолша-Адамара  $Wal_i(t)$ , число которых равно  $k$ . Если взять основание кода Рида-Соломона  $q=256$ , то  $k = \log_2 256 = 8$ , а последовательности  $Wal_i(t)$  имеют вид [1,3]:

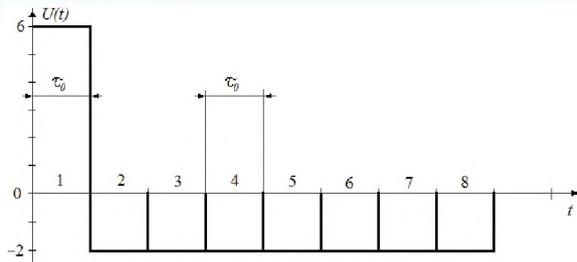
1	1	1	1	1	1	1	1	$-Wal_1(t)$
1	0	1	0	1	0	1	0	$-Wal_2(t)$
1	1	0	0	1	1	0	0	$-Wal_3(t)$
1	0	0	1	1	0	0	1	$-Wal_4(t)$
1	1	1	1	0	0	0	0	$-Wal_5(t)$
1	0	1	0	0	1	0	1	$-Wal_6(t)$
1	1	0	0	0	0	1	1	$-Wal_7(t)$
1	0	0	1	0	1	1	0	$-Wal_8(t)$

Формирователи полярного кода (ФПК) преобразуют униполярные двоичные символы  $\{1,0\}$  в полярные  $\{+1,-1\}$ . Например, если на вход первого сумматора (верхнего на рисунке 1) по модулю два пришла «1» с выхода СД, то на выходе ФПК1 будет последовательность из  $n=8$  символов  $\{-1-1-1-1-1-1-1-1\}$ , если на вход второго сумматора по модулю два поступил «0», то на выходе ФПК2 будет последовательность из  $n=8$  символов  $\{+1-1+1-1+1-1+1-1\}$  и т.д.

Полярные последовательности двоичных символов с выходов ФПК поступают на сумматор ( $\Sigma$ ), где осуществляется кодовое уплотнение ортогональных сигналов, а на выходе сумматора формируется многоуровневый  $n$ -разрядный (в нашем случае  $n=8$ ) сигнал, который переносит  $k=n=8$  бит, т.е. на выходе сумматора сформирован безызбыточный внутренний код, временное представление которого для кода на выходе СД в виде  $\{10000000\}$  будет следующим (рисунком 2).



**Рис. 1.** Структурная схема системы передачи с каскадным кодированием данных



**Рис. 2.** Пример временного представления сигнала на выходе сумматора

При изменении кода на выходе CD уровни сигнала будут изменяться, однако ширина частотного спектра останется неизменной и будет определяться длительностью элемента  $\tau_0$ .

Сигнал с выхода сумматора поступает в канал связи, где осуществляется его модуляция и на сигнал накладываются помехи  $n(t)$ .

На приемной стороне осуществляется корреляционное декодирование (КД) (принятый сигнал перемножается с известными полярными ортогональными последовательностями  $Wal_1^{(n)}(t)$ , определяются коэффициенты взаимной корреляции  $\rho_i$ ). Алгоритм принятия решения о двоичном символе следующий [5]:

- если  $\rho_i > 0$ , принят «0» символ;
- если  $\rho_i < 0$ , принят «1» символ;
- если  $\rho_i = 0$ , осуществляется стирание.

Для представленного на рисунке 2 примера коэффициенты  $\rho_i$  будут следующими:

● на выходе первого корреляционного декодера КД1 получим

$$\begin{array}{r}
 +6 \quad -2 \\
 \times \\
 +1 \quad +1 \\
 \hline
 +6 \quad -2 \quad = \rho_1 = -8
 \end{array}$$

и это правильное решение о принятом «1» символе («1» и передавалась);

● на выходе второго КД2 получим:

$$\begin{array}{r}
 +6 \quad -2 \\
 \times \\
 +1 \quad -1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad -1 \\
 \hline
 +6 \quad +2 \quad -2 \quad +2 \quad -2 \quad +2 \quad -2 \quad +2 \quad = \rho_2 = +8
 \end{array}$$

и это правильное решение о принятом «0» символе.

Очевидно, что  $\rho_3 = \rho_4 = \rho_5 = \rho_6 = \rho_7 = \rho_8 = +8$  и соответствуют правильному решению о принятых «0» символах.

Если помехи исказили сигнал, то результат декодирования на выходах КД приведет к ошибочному решению о переданном двоичном символе кода Рида-Соломона. Например, пусть принятый сигнал имеет вид  $\{+3-1-1+1-1-1+1+1\}$ , т.е.

искажены все 8 разрядов (пакет ошибок). В этом случае на выходе первого КД получим

$$\begin{array}{r}
 +3 \quad -1 \quad -1 \quad +1 \quad -1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad \text{-искаженный} \\
 \text{групповой сигнал;} \\
 \times \\
 +1 \quad \text{-последовательность} \\
 \hline
 +3 \quad -1 \quad -1 \quad +1 \quad -1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad = \rho_1 = +2, \\
 \text{Wal}_1^{(n)}(t);
 \end{array}$$

т.е. принимается решение о переданном «0» символе, хотя передавался «1» символ. Следовательно, будут ошибочными решения и о двоичных символах внешнего кода Рида-Соломона на выходе дешифратора (DC), которые поступают на вход декодера кода Рида-Соломона (ДКРС) [1].

Определим помехоустойчивость каскадного кодирования, при котором в качестве внешнего кода будем использовать двоичные ( $q=256$ ) коды Рида-Соломона, а в качестве внутреннего – двоичные ортогональные коды с параллельной синхронной передачей.

Известно [1,6], что вероятность ошибочного декодирования двоичного символа по алгоритму Рида-Соломона определяется выражением

$$P_E \approx \frac{1}{N} \sum_{i=T_H+1}^N i C_N^i P_S^i (1 - P_S)^{N-i}, \quad (1)$$

где  $N$  – длина кода Рида-Соломона;

$T_H$  – число ошибок, которое код может исправить, равное  $T_H = \left\lfloor \frac{N-K}{2} \right\rfloor$ ,

$K$  – число двоичных информационных символов, которое содержит код Рида-Соломона;

$$C_N^i = \frac{N!}{i!(N-i)!};$$

$P_S$  – вероятность ошибочного решения о принятом двоичном символе на выходе дешифратора DC (рисунк 1).

Так как вероятность  $P_S$  в известной научной литературе не оценивалась, то было проведено имитационное моделирование представленной системы передачи и получено аппроксимационное выражение для вероятности  $P_S$ , как функции отношения сигнал/шум  $h_0^2$  и  $k=8=n$  в виде:

$$P_S \cong 1,556 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-2,014 \cdot h_0^2} - 8,574 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-1,249 \cdot h_0^2}; \quad (2)$$

где  $h_0^2$  в дБ.

Так как помехоустойчивость системы передачи принято оценивать вероятностью битовой ошибки  $P_b \approx \frac{P_E}{2}$  в зависимости от  $h_0^2$ , то это можно сделать при известных параметрах кода Рида-Соломона ( $N, K, q$ ).

В таблице 1 представлены результаты расчетов вероятностей  $P_b, P_s$  при различных значениях  $h_0^2$  и параметров кодов Рида-Соломона ( $q=256$ ) [1].

**Таблица 1**  
**Помехоустойчивость каскадного кодирования**

Параметры кодов (N,K)	Отношение сигнал/шум $h_0^2$ , дБ				
	-2	-1,5	-1,0	-0,5	0
(256,224)	$P_s=0,041$	$P_s=0,027$	$P_s=0,023$	$P_s=0,019$	$P_s=0,0147$
$T_u=16$	$P_b=1,25 \cdot 10^{-3}$	$P_b=3,5 \cdot 10^{-4}$	$P_b=2,33 \cdot 10^{-5}$	$P_b=7,05 \cdot 10^{-7}$	$P_b=1,25 \cdot 10^{-8}$
(256,160)	$P_s=0,136$	$P_s=0,127$	$P_s=0,112$	$P_s=0,097$	$P_s=0,084$
$T_u=48$	$P_b=1,25 \cdot 10^{-3}$	$P_b=3,5 \cdot 10^{-4}$	$P_b=2,33 \cdot 10^{-5}$	$P_b=7,05 \cdot 10^{-7}$	$P_b=1,25 \cdot 10^{-8}$
(256,128)	$P_s=0,189$	$P_s=0,179$	$P_s=0,16$	$P_s=0,144$	$P_s=0,128$
$T_u=64$	$P_b=1,25 \cdot 10^{-3}$	$P_b=3,5 \cdot 10^{-4}$	$P_b=2,33 \cdot 10^{-5}$	$P_b=7,05 \cdot 10^{-7}$	$P_b=1,25 \cdot 10^{-8}$
(256,112)	$P_s=0,217$	$P_s=0,2$	$P_s=0,187$	$P_s=0,169$	$P_s=0,15$
$T_u=72$	$P_b=1,25 \cdot 10^{-3}$	$P_b=3,5 \cdot 10^{-4}$	$P_b=2,33 \cdot 10^{-5}$	$P_b=7,05 \cdot 10^{-7}$	$P_b=1,25 \cdot 10^{-8}$

Анализ таблицы показывает:

- использование ортогональных кодов в качестве внутренних и их параллельной синхронной передачи позволяет получить повышенную помехоустойчивость каскадных кодов по сравнению с их известными конструкциями;

- увеличение избыточности внешних кодов Рида-Соломона позволяет решать задачи по исправлению длинных пакетов ошибок (для кода (256,112) длина пакета исправляемых ошибок  $T_u=8 \cdot T_u=576$  двоичных символов) и это при  $h_0^2 \leq 0$  дБ.

### Литература

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е изд., испр. Пер. с англ. М.: Вильямс, 2003. 1104 с.
2. Вишневецкий В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G. М.: Техносфера, 2009. 472 с.

3. Зеленецкий В.В. Принципы построения робастных систем передачи информации. МО РФ, 2001. 374 с.

4. Зеленецкий Ю.В. Система передачи и приема дискретных сигналов. Патент на полезную модель №63605. Опубл. 2007 г.

5. Зеленецкий Ю.В., Зеленецкий В.В., Наконечный Б.М. Статистический анализ двоичных циклических кодов при мягком декодировании их недвоичных представлений // Известия Института инженерной физики, 2012. №2(24). С. 2-7.

6. Зеленецкий Ю.В. Методы информационно-статистического анализа и алгебраического синтеза в конечном поле корректирующих кодов систем телекоммуникаций повышенной помехозащищенности с широкополосным доступом. Дисс. на соиск. ... докт. техн. наук. Серпухов: МОУ «ИИФ», 2014. 322 с.



УДК 629.786

## МЕТАГРАММАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОД ДЕКОДИРОВАНИЯ ПРЕФИКСНЫХ КОДИРОВАННЫХ ДАННЫХ

## METAGRAMMATIC MODEL AND DECODING METHOD OF PREFIXED CODED DATA

**Андрей Иванович Костогрызов**

заслуженный деятель науки РФ  
доктор технических наук, профессор  
директор НИИ прикладной математики и сертификации  
Адрес: 125047, Москва, ул. Вавилова д. 44, к. 2  
Тел.: +7(903)795-65-24  
E-mail: akostogr@mail.ru

**Сергей Сергеевич Аджемов**

доктор технических наук, профессор  
начальник НИЧ  
Московский технический университет связи и информатики  
Адрес: 111024, Москва, ул. Авиамоторная д. 8а  
Тел.: +7(985)991-08-63  
E-mail: adjemov\_srd@mail.ru

**Александр Олегович Атакищев**

аспирант  
Московский технический университет связи и информатики  
Адрес: 111024, Москва, ул. Авиамоторная д. 8а  
Тел.: +7(910)212-83-38  
E-mail: 1993alexandr@gmail.com

**Олег Игоревич Атакищев**

доктор технических наук, профессор  
заместитель генерального директора по специальным проектам  
МОУ «ИИФ»  
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д.1а  
Тел.: +7(925)035-35-14  
E-mail: aoi007@mail.ru

### Аннотация

В статье для решения задач декодирования префиксных кодов предложены метаграмматическая модель и метод декодирования префиксных кодированных данных. Рассмотрен ряд характеристик предложенного метода и особенности его программной реализации.

**Ключевые слова:** префиксные коды, цифровые сети связи, локально-частотный метод декодирования, метаграмматики, модель кодированных данных, метод поиска.

### Summary

In the article, to solve decoding problems of prefix codes, a metagrammatic model and a method for decoding prefix encoded data are proposed. A number of characteristics of the proposed method and features of its software implementation are considered.

**Keywords:** prefix codes, digital communication networks, local-frequency decoding method, metagrammatics, coded data model, search method.

Современный этап развития цифровых сетей связи (ЦСС) в РФ и наиболее развитых странах мира характеризуется интенсивным внедрением перспективных систем кодирования со сжатием информации.

Одним из наиболее широко применяемых классов кодов сжатия при этом являются префиксные коды (ПК), основанные на учете стати-

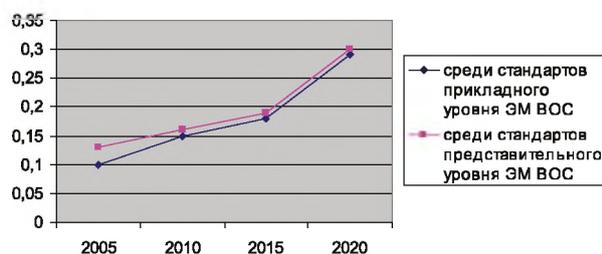
стики встречаемости кодируемых элементов в подлежащих сжатию данных [1-10].

Внедрение префиксных кодовых стандартов в перспективных системах связи стало в последние годы доминирующим направлением при создании перспективных средств сжатия изображений, видео, сигнализационных, мультимедийных и др. классов данных для их эффектив-

ной передачи. В работах [1-6] проведен анализ основных тенденций использования ПК при передаче различных классов данных в цифровых системах связи. В частности показано [11], что в последние годы существенно вырос общий объем передаваемых в ЦСС кодированных префиксных данных (рисунк 1), существенно повысилась разнообразие используемых форматов ПК, существенно увеличались размеры и скорости передачи кодированных сообщений (файлов).

Это определяет необходимость дальнейшего повышения эффективности оперативной обработки больших массивов разнородных синтаксически насыщенных структур кодированных со сжатием данных. При этом структурно-сложный характер форматов кодирования оказывает существенное влияние на эффективность их декодирования.

Синтаксически многозначный характер связей в кодовых структурах префиксных кодированных данных (ПКД) различных форматов определяет, в целом, комплекс противоречивых требований при повышении эффективности их декодирования с учетом высокого уровня их структуризации, с одной стороны, а также – необходимости повышения быстродействия их декодирования для современных высокоскоростных ЦСС.



**Рис. 1.** Доля используемых классов префиксных форматов в общем объеме форматов кодирования

Проведенный анализ возможных направлений повышения эффективности решения задач декодирования ПКД в существующих и перспективных ЦСС показал, что выполнение в этих условиях требований к уровню эффективности и качества обработки префиксных данных может быть достигнуто путем внедрения новых методов декодирования разноформатных сложноструктурированных ПКД, основанных в первую очередь на применении перспективных метаграмматических моделей и методов декодирования ПК [1-6, 10-18].

При создании подобных моделей и методов на единой основе метаграмматического подхода может быть обеспечено системное объединение

и использование различных алгоритмов и программ высокоскоростной обработки разнородных ПКД.

Современный этап внедрения перечисленных моделей и методов в практику создания систем декодирования ПК характеризуется следующими основными особенностями [1-18]:

- в настоящее время для решения отдельных задач декодирования ПКД находят применение элементы продукционных (в первую очередь грамматических), конечно-автоматных, Марковских, статистических и ряда структурных алгоритмов декодирования сложноструктурированных кодовых последовательностей;

- не полностью разработаны методические и реализационные основы эффективного решения задач декодирования ПКД, являющихся базисом эффективного автоматического решения большого числа типовых задач обработки префиксных данных, в первую очередь – со сжатием информации.

Преодоление сложившегося объективного противоречия между современными требованиями к средствам декодирования ПК в ЦСС (в первую очередь по быстродействию) и возможностями существующих методов и программ декодирования ПКД возможно на путях дальнейшего развития методического аппарата теории метаграмматик [1-14, 16] применительно к решаемой задаче.

В связи с вышеизложенным решение задачи создания моделей и методов декодирования ПК для повышения быстродействия обработки ПКД в ЦСС является актуальным и представляет несомненный практический интерес.

В статье на основе выявленных структурных особенностей рассматриваемого класса ПКД в рамках развития методического аппарата теории метаграмматик применительно к решаемой задаче, в качестве формальной основы создания модели ПКД используется аппарат теории метаграмматик [1-4].

В данном случае модель представляется в виде следующей стохастической метаграмматики (СМГ):

$$G_{ПКД} = \langle \{G_{i1}^{(1)}\}, \{G_{i2}^{(2)}\}, \{G_{i3}^{(3)}\}, \{G_{i4}^{(4)}\}, \{G_{i5}^{(5)}\}, W_{ПКД} \rangle.$$

В данной СМГ стохастические грамматики  $\{G_{i1}^{(1)}\}$  моделируют в рекурсивной форме общие синтаксические структуры конкретных схем кодирования ПКД. В частности, для стандартов типа Т.4 [7] они определяют порядок чередования схем кодирования МН и МР для различных коэффициентов К (для нестандартных схем – чередование схем Н, без сжатия). Аналогично, для формата Т.81 [9] – чередование используемых схем кодирования (равномерных и неравномер-

ных, без сжатия, с потерей и без потери информации).

Стохастические грамматики  $\{G_{12}^{(2)}\}$  определяют с помощью регулярных правил подстановок порядок чередования сегментов кодированных ПКД (строк, блоков, матриц),  $\{Gi3(3)\}$  – допустимые продукционные правила чередования кодовых слов (в том числе и составных) в схеме ПКД. В частности, для формата Т.4 данные продукции имеют усеченный (по сравнению с известными моделями) вид:

$$\begin{aligned} A_0 &\rightarrow I_{FA}A_1 | I_{RA}A_2 | I_{RTSA}A_{14}; \\ A_1 &\rightarrow I_{06}A_2 | I_{06}A_3 | I_{06}A_4; \\ A_2 &\rightarrow I_{06}A_3 | I_{06}A_4; \quad A_3 \rightarrow I_{04}A_5 | I_{04}A_1 | I_{04}A_4; \\ A_4 &\rightarrow I_{FA}A_0; \quad A_5 \rightarrow I_{04}A_1 | I_{04}A_4; \\ A_6 &\rightarrow I_{nA}A_6 | I_{06}A_6 | I_{2A}A_7 | I_{nA}A_4 | I_{06}A_4; \\ A_7 &\rightarrow I_{06}A_8 | I_{06}A_9 | I_{04}A_{10} | I_{04}A_{11} | I_{06}A_4 | I_{04}A_4; \\ A_8 &\rightarrow I_{06}A_9 | I_{06}A_4; \quad A_9 \rightarrow I_{04}A_{12} | I_{04}A_6 | I_{04}A_4; \\ A_{10} &\rightarrow I_{04}A_{11} | I_{04}A_4; \quad A_{11} \rightarrow I_{06}A_{13} | I_{06}A_6 | I_{06}A_4; \\ A_{12} &\rightarrow I_{04}A_6 | I_{04}A_4; \quad A_{13} \rightarrow I_{06}A_6 | I_{06}A_4. \end{aligned}$$

В характеристической схеме данной стохастической грамматики используются только регулярные продукции и обобщенные терминалы (типа I), которые соответствуют конкретному кодовому слову в стандарте Т.4. Продукции содержат нетерминалы, обозначаемые заглавными буквами А, соответствующими состояниям при переходах от кодовых слов различных длин и цветов в формате Т.4.

$\{GT_{i4}^{(4)}\}$  – множества стохастических грамматик, моделирующих правила преобразования исходных двоичных символов равномерного или неравномерного кода в выходные последовательности символьных, растровых или блочных данных в соответствии с кодовыми стандартами. Грамматики данного уровня имеют следующий вид:

$G_{T_{i4}}^{(4)} = \langle S_{i4}^{(4)}, V_{Ni4}^{(4)}, \{V_{Txi4}^{(4)}, P_{i4}^{(4)} \rangle$ . В этой стохастической грамматике множество терминалов соответствует исходным кодовым словам и декодированным последовательностям. Множество продукции  $R_{i5}^{(5)}$  имеет вид:

$$A_{ki4}^{(4)} \rightarrow a_{ji4}^{(4)} b_{ji4}^{(4)} A_{fi4}^{(4)},$$

где  $A_{ki4}^{(4)}, A_{fi4}^{(4)} \in V_{Ni4}^{(4)}, a_{ji4}^{(4)} \in V_{Txi4}^{(4)}, b_{ji4}^{(4)} \in V_{Tvyxi4}^{(4)}$

Стохастические грамматики  $\{G_{15}^{(5)}\}$  моделируют в рекурсивной форме допускаемые правила генерации исходных двоичных символов для терминалов (в первую очередь – префиксных кодовых слов) всех вышележащих уровней в соответствии с кодовыми стандартами.

В стохастической схеме метаграмматики  $W_{ПКД}$  правила согласования TS(1) задают порядок декомпозиции терминалов грамматик верхнего

уровня на цепочки, порождаемые грамматиками нижних уровней МГ. С помощью TP(4) правил согласования задается порядок данной декомпозиции. TS(3) правила согласования определяют переходы от терминалов к начальным символам грамматик нижележащих уровней.

Путем комбинированного использования в схеме  $W_{ПКД}$  правил согласования TS(1), TS(3) и TP(4) в разработанной модели в отличие от известных возможна спецификация более сложных кодовых конструкций с использованием в МГ регулярных грамматик. В случае использования для этих целей обычных формальных грамматик необходимы более сложные и громоздкие модели на основе грамматик непосредственно составляющих по классификации Хомского [19].

Также в модели при разделении на уровни и исключении повторного использования продукционных правил существенно упрощается ее модификация при необходимости учета структурных особенностей новых префиксных кодовых стандартов, исключается дублирование продукции, что для рассматриваемого случая снижает более чем в 2,3 раза число продукции по сравнению с аналогичной одноуровневой грамматикой.

В целом, проведенные оценки числа продукции в модели и ее сложности по Хомскому позволили сделать вывод, что применение МГ создает необходимые предпосылки для создания более эффективных (в плане снижения временной сложности) алгоритмов декодирования ПКД для использования в ЦСС.

С ориентацией на разработанную модель на основе стохастических МГ предложен локально-частотный метод декодирования ПКД.

Название метода отражает его новизну и основную особенность, состоящую в учете при синтаксическом анализе МГ подсчитанных к данному моменту частот встречаемости кодовых слов и производных конструкций при решении задач поиска соответствия префикса входной цепочки выходному декодированному значению. При этом также осуществляется стохастическое управление выбором локальной префиксной таблицы и префиксных кодов в ней, рассматривая полученные частоты как оценки частоты использования правил подстановки и правил согласования МГ. При этом, в отличие от известных методов возможна опережающая проверка соответствия более длинных кодовых слов префиксу при поиске в локальных таблицах ПКД. При этом, по существу, реализуется специфический метод поиска в локально-префиксных таблицах кода ПКД, зависящий не от заранее вычисленных вероятностей их встречаемости в

кодовой структуре и присвоенных по методике Хаффмана значениям [9], а от вычисленных в процессе декодирования локальных частот их встречаемости в конкретном документе.

Предложенный метод декодирования ПКД предусматривает выполнение следующих основных этапов.

1. Заполнение эталонных таблиц, соответствующих регулярным правилам подстановки и согласования в характеристической МГ, соответствующей предложенной выше стохастической МГМ, моделирующей структурные особенности ПКД.

2. Формирование в соответствии с известными усредненными априорными значениями таблиц частот встречаемости правил подстановки и согласования для продукционных правил и правил согласования метаграмматической модели.

3. Ввод цепочки декодируемой последовательности с обеспечением буферизации и привязкой к структурам файлов полученных при обработке ПКД в процессе решения конкретных задач их сбора, хранения и предобработки.

4. Выделение в обрабатываемой последовательности данных состояний достижения границ кодовых последовательностей прикладного уровня ЭМ ВОС.

5. Выполнение для текущего состояния синтаксического анализа префикса кодовой цепочки ПКД в соответствии со стохастическими правилами согласования и продукциями процедур определения актуализируемых локальных таблиц декодирования начальной части анализируемой цепочки ПКД прикладного уровня ЭМ ВОС.

6. Определение границ и структуры кодовых слов на текущем этапе разбора с использованием процедур поиска и сравнения по максимальным локальным частотам префиксных кодов основных классов ПКД (для режимов со сжатием и без сжатия).

7. Выдачу декодированных значений кодов в выходную последовательность в соответствии с текущей кодовой таблицей. Пересчет параметров префикса и переход к следующему состоянию МГМ в дереве локального разбора.

8. Проверку достижения границы сегментированной последовательности ПКД. При достижении границы - переход на шаг 9, в противном случае - на шаг 5.

9. Смену состояния в дереве разбора метаграмматической модели и переход к декодированию следующей сегментированной цепочки ПКД. Если достигнуто заключительное состояние в разборе ПКД – выдача сигнала об оконча-

нии декодирования, в противном случае – переход на шаг 4.

При реализации данного метода осуществляется синтаксический анализ (грамматический разбор) с использованием предложенной метаграмматической модели с модификацией под особенности учета стохастических правил согласования и подстановки.

Для реализации его основного шага 6, связанного с поиском и преобразованием неравномерных префиксных кодов, предложена процедура поиска и сравнения по максимальным локальным частотам префиксных кодов направленным по текущим значениям частот для стохастических правил согласования и продукций. На основе данной процедуры также проводится определение продукционных правил трансляции кода в выходную декодированную последовательность.

Данная процедура может быть реализована с использованием предложенного частного метода, обеспечивающего поиск и сопоставление префиксных кодов на текущем шаге разбора [10].

Анализ выполняемых в нем шагов показал, что для рассматриваемых ПКД предложенный метод сопоставим по сложности с известными методами синтаксического анализа МГ (последовательным, адресно-наращиваемым) [13, 14, 18], используемыми при декодировании ПКД, при более низкой средней временной сложности (примерно в 1,7 раза) и незначительном увеличении емкостной сложности (в 1,1 раза).

В целом это дает выигрыш по числу стандартных операций для общего метода декодирования в 1,2-1,3 раза при несущественном увеличении требуемого объема памяти для хранения таблиц накопленных частот правил согласования и подстановки МГМ.

Все это создает основу для практической реализации предложенного метода декодирования ПКД.

В частности, проведенный анализ показал, что при программной реализации на современных универсальных и специализированных высокоскоростных вычислительных устройствах необходимо предусмотреть следующие моменты:

- должны быть реализованы подпрограммы структурно-статистического поиска и преобразования как отдельных префиксов, так и составных префиксных структур ПКД;

- должны быть использованы подпрограммы проверки ошибок декодирования, основанные на алгебраических операциях с декодированными значениями в рамках одной кодированной строки;

- процедуры выделения неравномерных одиночных и составных префиксов должны быть увязаны с использованием соответствующих подпрограмм управления по производственным правилам и правилам согласования;

- при формировании выходных декодированных последовательностей должны быть совмещены структуры всех строк, в том числе и закодированных различными кодами (типа МН/МР).

Показано, что основное внимание при реализации программ декодирования (ПД) ПК должно быть уделено вопросам реализации процедуры подсчета и учета частот встречаемости префиксных кодовых слов в текущем декодируемом массиве. Это определяет необходимость введения в ПД соответствующей подпрограммы управления заполнением соответствующих таблиц частот и их использования при выборе очередного шага декодирования.

Все это и определило структуру и взаимодействие подпрограмм в реализуемой ПД ПКД.

На *рисунке 2* представлена структура разработанной ПД ПКД в виде основных подпрограмм (ПП) и их взаимосвязей. В названиях подпрограмм отражены их основные функции, реализуемые при декодировании ПКД. В отличие от известных подпрограмм [15-22], особенностью реализованной ПД ПКД является использование следующих ПП, предназначенных для реализации уникальных операций предложенного метода декодирования:

- управления сегментацией ПКД;
- синтаксически управляемого вычисления параметров сегментации ПКД;
- многоуровневого управления подпрограммами декодирования ПКД на основе стохастических МГ;
- выделения текущего префикса кодового слова в кодируемой строке ПКД;
- поиска для соответствующих наборов таблиц ПКД;
- управления заполнением таблиц частот, поиском и считыванием кодовых слов ПКД;
- преобразования кодовых слов в выходную последовательность декодированных данных;
- управления преобразованием кодовых слов и выходной буферизацией на основе стохастической МГ.

Данные ПП выделены на *рисунке 2* темным тоном, стрелки на схеме соответствуют информационным и управляющим взаимосвязям ПП.

Декодирование ПКД с использованием представленной совокупности подпрограмм производится следующим образом.

Входная последовательность ПКД с учетом

структурных особенностей сегментации строк массива данных (EOI и др. структурные параметры строк) в соответствии с правилами согласования и подстановки метаграмматической модели разбивается на строки переменной длины и соответствующего формата кодирования (МН, МР и т.п.). Правила согласования и производственные правила в подпрограммах задаются в виде таблиц вида «нетерминал-адрес ячейки в массиве терминалов и/или нетерминалов».

ПП выделения текущего префикса кодового слова в кодируемой строке ПКД и поиска для соответствующих наборов таблиц ПКД реализуют с учетом значений в таблицах частот основные операции предложенного метода поиска префиксов кодовых слов с учетом локальной статистики для данного массива ПКД. Это позволяет существенно сократить число операций поиска в таблицах в отличие от алгоритмов на основе усредненной статистики, реализованной в стандартах ITU-T. При этом, в отличие от последовательных алгоритмов определения декодированных значений по возрастанию длины префикса, реализуется алгоритм подбора длины префикса как в сторону увеличения, так и в обратном порядке. Все это определяется набранной к данному моменту статистикой встречаемости кодовых слов в данном массиве ПКД. Также предложено в качестве исходной использовать стандартную статистику ITU-T с последующей ее корректировкой. После определения значения одиночного префикса проводится дополнительная проверка на наличие составных префиксных кодовых слов. Значения полученных кодовых слов в виде длин серий или меток начала серий поступают на подпрограммы преобразования в выходной массив и буферизации с последующей выдачей декодированных последовательностей на устройства передачи, отображения, промежуточного хранения и т.п. в зависимости от решаемой задачи в устройствах ЦСС.

После декодирования всей последовательности массива данных процесс декодирования завершается.

В названиях ПП управления явно отражена зона их ответственности. ПП без выделения цветом, выполняют стандартные функции управления обработки и выдачи двоичных последовательностей.

Реализация программы и ее апробация подтвердила основной вывод о возможности существенного повышения быстродействия декодирования ПК (почти в 2 раза). Снижение числа операций при декодировании и, соответственно, повышение быстродействия программы достигается в первую очередь при выполнении

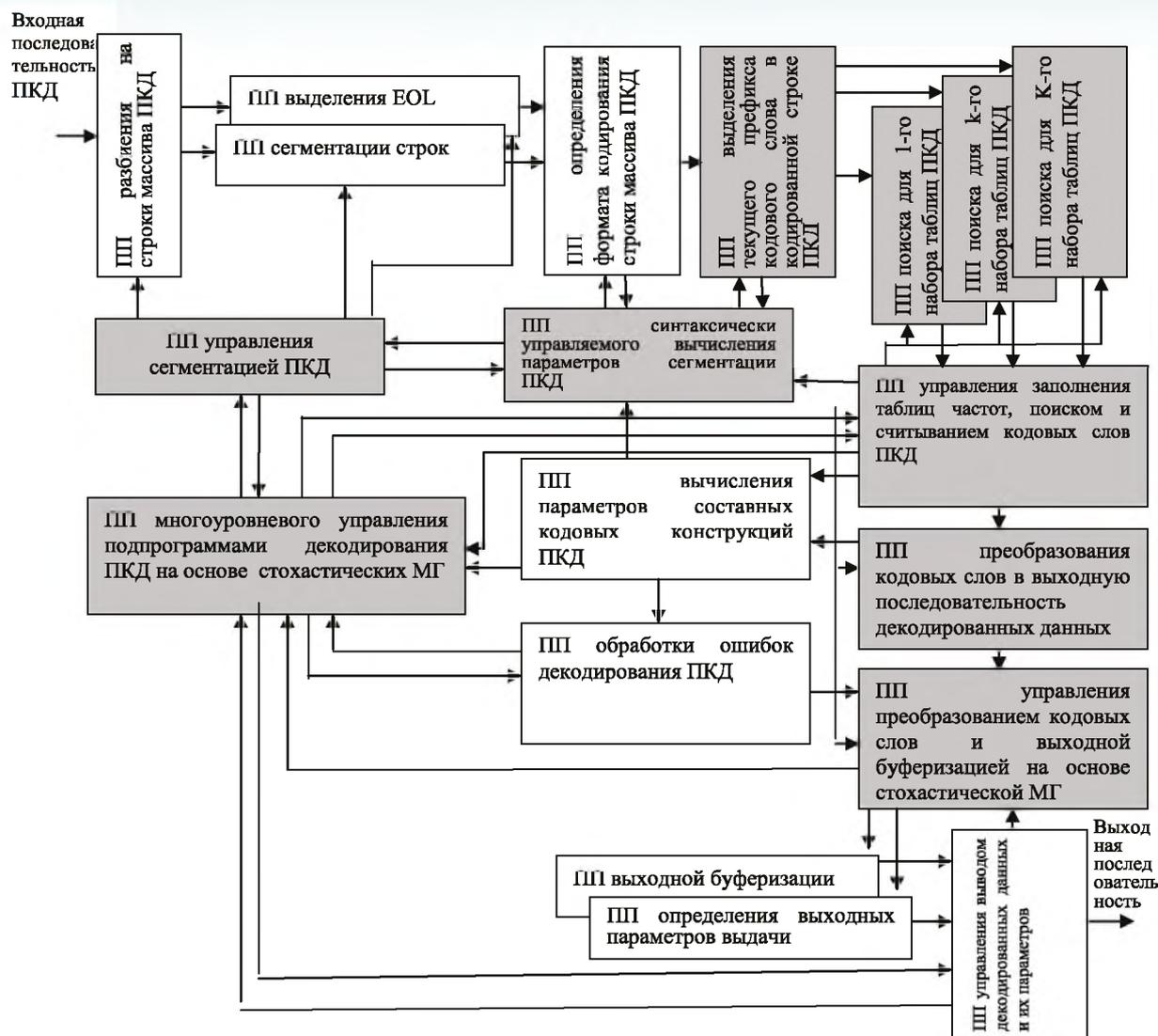


Рис. 2. Структура программы декодирования ПКД с разбивкой на подпрограммы

наиболее времяемких процедур поиска неравномерных префиксов локальной статистики для конкретного ПКД.

## Литература

1. Атакищев О.И. Метаграмматики и особенности их применения для формального описания сигналов и протоколов документальных служб связи и передачи данных. Ч. 1. Метаграмматики. Основные понятия и определения // Телекоммуникации, 2001. №10. С.2-6.
2. Атакищев О.И. Метаграмматики и особенности их применения для формального описания сигналов и протоколов документальных служб связи и передачи данных. Ч. 2. Классификация метаграмматик // Телекоммуникации, 2001. № 12, С. 2-8
3. Атакищев О.И. Метаграмматики и особенности их применения для формального опи-

сания сигналов и протоколов документальных служб связи и передачи данных. Ч. 3. Основные свойства метаграмматик // Телекоммуникации, 2003. № 3 С. 2-7.

4. Атакищев О.И., Медведев Г.Н., Варганов А.В. Особенности кодирования цифровых факсимильных сообщений. Ч. 1. Схемы кодирования цифровых факсимильных сообщений. Особенности схем кодирования двухградационных изображений // Телекоммуникации, 2001. № 11. С. 11-15.
5. Атакищев О.И., Медведев Г.Н., Варганов А.В. Особенности кодирования цифровых факсимильных сообщений. Ч. 2. Схемы кодирования цветных и полутоновых изображений JPEG и JPEG2000 // Телекоммуникации, 2001. №12. С.21-28.
6. Атакищев А.О. Метаграмматическая модель кодированных телематических данных //

Известия Юго-Западного государственного университета, 2013. №3(48). С.49-52.

7. Рекомендация ИТУ-Т Т.4. «Стандартизация аппаратуры группы 3 (G3) для передачи документов», октябрь 1997.

8. Рекомендация ИТУ-Т Т.6. «Схемы кодирования и функции управления кодированием для G4», ноябрь 1998.

9. Рекомендация ИТУ-Т Т.81. «Основные принципы цифрового кодирования тоновых неподвижных изображений. Требования и принципы кодирования». Information technology - Digital compression and coding of continuous-tone still images - Requirements and guidelines, сентябрь 1992.

10. Атакищев А.О. Метаграмматическая модель префиксных кодированных данных // Известия Юго-Западного государственного университета, 2015. №3(48). С.49-52.

11. 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. 345 с.

12. Атакищев А.О., Емельянов С.Г. Основные особенности форматов кодирования телематических данных // Известия Юго-Западного государственного университета, 2013. №3(48). С.52-58.

13. Атакищев А.О., Николаев А.В., Белов А.В. Использование квадродеревьев в динамических электронных фотокартах // Известия Юго-Западного государственного университета, 2011. №6(39). Ч.2. С.36-40.

14. Атакищев А.О. Продукционная машина-генератор для обработки символьных данных дискретных объектов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия «Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение», 2012. №2. Ч.1. С.111-115.

15. Атакищева И.В. Эталонная модель двойственно-атрибутивной транслирующей метаграмматики и структурно-лингвистический способ обработки сложноорганизованных данных // Известия Тульского государственного университета. Серия «Технологическая систематика». Вып.14, 2006. С.24-28.

16. Городецкий В.И., Дрожжин В.В., Юсупов Р.М. Многоуровневые атрибутивные грамматики для моделирования сложных структурно-динамических систем // Известия АН СССР. Техническая кибернетика, 1986. №1. С. 165.

17. Загоруйко Н.Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. Новосибирск: Изд-во Института математики, 1999. 270 с.

18. Занун, Н.И., Атакищев О.И. [и др.]. Структурно-лингвистическая модель неравномерных префиксных кодов, используемых для передачи документальной информации // Телекоммуникации и транспорт, 2010. №11. С.15-17.

19. Искусственный интеллект. Справочник. В 3-х кн. / Под ред. Д.А. Поспелова. М.: Радио и связь, 1990.

20. Костокрызов А.И., Безкоровайный М.М., Львов В.М. Инструментально-моделирующий комплекс оценки качества функционирования информационных систем «КОК». М.: «Вооружение. Политика. Конверсия», 2001. 304 с.

21. Атакищев О.И., Атакищева Е.М., Атакищев А.О. Вариант выбора поиска признаков при общей классификации методов поиска // Известия Юго-Западного государственного университета, 2014. №3(54) С. 23-30.

22. Костокрызов А.И., Атакищев О.И., Атакищев А.О. Метаграмматический метод поиска в больших массивах разнородной информации // Современные тенденции в образовании и науке. Тамбов, 28 ноября 2014 г. Ч. 1. С. 69-73.

УДК 621.833

## АЛГОРИТМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ АНАЛОГОВОЙ ИНФОРМАЦИИ В ЦИФРОВОЙ КОД В ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ

## ALGORITHM FOR CONVERTING ANALOG INFORMATION INTO A DIGITAL CODE IN A MEASURING SYSTEM

**Владимир Вениаминович Кулешов**

кандидат технических наук, доцент

доцент кафедры «Приборы и  
биотехнические системы»

ФГБОУ ВО «Тульский

государственный университет»

Адрес: 300012, г. Тула, проспект Ленина, д. 92

Тел.: 8(4872) 35-05-52

E-mail: v47kuleshov102a@gmail.com

### Аннотация

Рассмотрены вопросы разработки алгоритма преобразования аналоговой информации в цифровой код. Получены зависимости позволяющие уменьшить величину апертурной ошибки.

**Ключевые слова:** апертурная ошибка, компаратор, управляющее устройство, цифровой код, уровень разряда, микро и макроуровни.

### Summary

Algorithm for converting analog information into a digital code in a measuring system. Questions of working out of algorithm of transformation of the analogue information in a digital code are considered. Dependences allowing are received to reduce size of an aperture error.

**Keywords:** an aperture error, the comparator, the actuation device, a digital code, category level, micro and macrolevels.

Точность работы измерительных систем механических величин (акселерометров, датчиков угловой скорости) определяется точностью ра-

боты интегрирующих аналоговых усилителей и порогового элемента. Кроме того, точность измерения механических величин зависит от па-

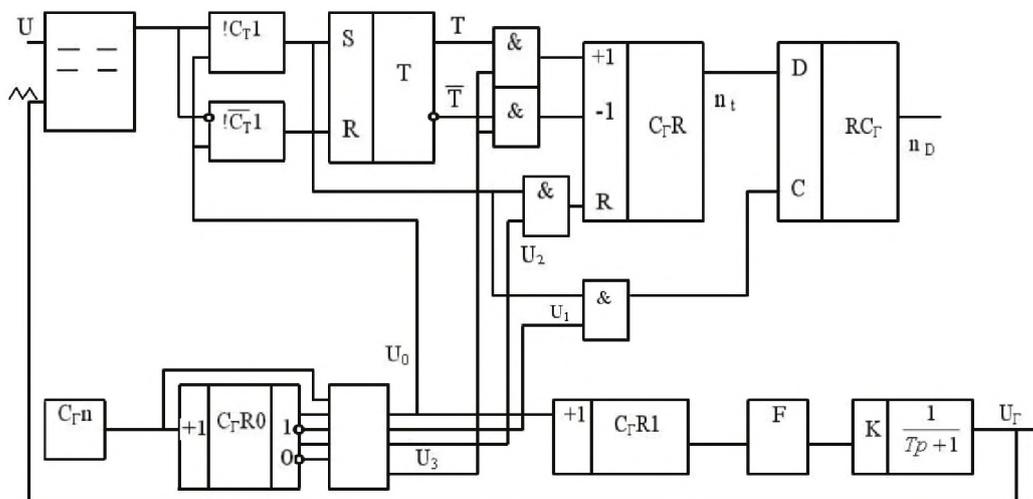


Рис. 1. Функциональная схема преобразования аналогового сигнала в цифровой код

раметров схемы электронного ключа, осуществляющего выборку информации. Основная погрешность измерения связана с конечностью времени заряда конденсатора интегрирующего усилителя, которая приводит к апертурной ошибке, свойственной схеме выборки и обработки информации [1,2].

Целью данной работы является разработка алгоритма преобразования аналоговой информации в цифровой код, при котором апертурная ошибка ограничена на уровне единиц младшего разряда.

В существующих измерительных системах аналоговая информация преобразуется в длительность временных интервалов, а затем с помощью счета временных интервалов формируется цифровой код [3,4]. В качестве преобразователя аналог-длительность используется аналоговый компаратор на один вход, которого подается входной сигнал, на другой треугольная пила. В итоге на выходе компаратора формируется двухуровневый сигнал, имеющий разную длительность. Выходной сигнал с компаратора представляется в виде сигнала разности высокого и низкого уровней [3]. Преобразователь длительность-цифровой код из асинхронного интервала высокого и низкого уровня выделяет синхронный интервал, в котором укладывается целое число импульсов, осуществляет счет временных интервалов, переписывает полученный код в выходной регистр и устанавливает счетчик в исходное состояние. Наиболее просто эта задача решается на основе управляющего устройства, вырабатывающего четыре импульса [1,3]. Формирование из асинхронного интервала высокого и низкого уровня синхронного интервала осуществляется с помощью ждущих синхронных генераторов одиночных импульсов, работающих по переднему и заднему фронту  $\downarrow U_{\tau}$  выходного сигнала с помощью компаратора и асинхронного RS-триггера. Счет временных интервалов осуществляется реверсивным счетчиком по входу +1, когда уровень сигнала высокий и по входу -1, когда уровень сигнала высокий по импульсу записи  $U_3$ . Запись результата счета в регистр осуществляется во время прямого перехода сигнала  $\uparrow U_{\tau}$  по импульсу  $U_1$ , установка счетчика в исходное состояние осуществляется по импульсу  $U_2$  и наличию прямого перехода  $U_{\tau}$ , что фиксируется с помощью ждущего синхронного генератора  $!C_{\tau}1$  [3].

Функциональная схема преобразования аналоговой информации в цифровой код, представленная на рисунке 1, содержит:

- $C_{\tau}R1$  – делитель частоты;
- $F$  – формирователь симметричного сигнала;

- $\frac{k}{Tp+1}$  – сглаживающий фильтр;
- $U$  – входной аналоговый сигнал;
- $U_{\tau}$  – напряжение треугольной пилы;
- $n_i$  – текущий цифровой код;
- $n_d$  – выходной цифровой код;
- $n_n$  – число информационных разрядов в счетчике.

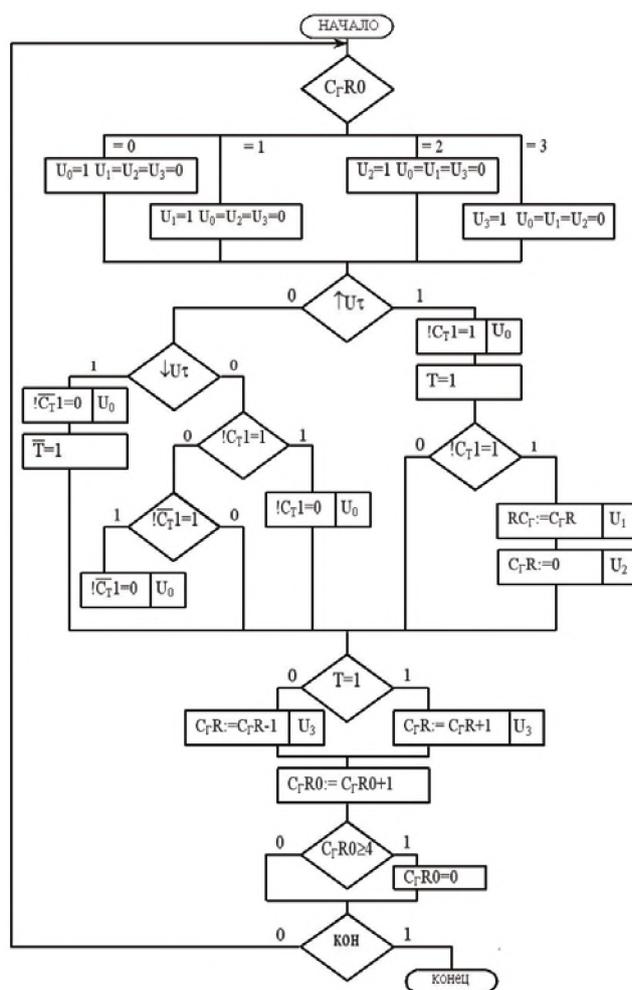
Постоянная времени сглаживающего фильтра определяется из соотношения

$$T \gg \frac{t_n}{\ln \frac{2^{nk} - 2}{2^{nk} - 1}},$$

где  $k$  – коэффициент передачи сглаживающего фильтра, значение которого определяется как  $k=2T/t_n$  ( $t_n$  – время преобразования сигнала).

Алгоритм работы преобразователя на микроуровне приведен на рисунке 2. Начальное состояние счетчика при преобразовании информации на микроуровне  $CTR=0$ .

Алгоритм работы преобразователя на ма-



**Рис. 2.** Алгоритм работы преобразователя аналог-код на микроуровне

кроуровне представлен на *рисунке 3*. В функциональной схеме использованы следующие обозначения:

$A$  – амплитуда сигнала;

$f_{TЧ}$  – тактовая частота генератора;

$n_k$  – разрядность цифрового кода;

$t_n$  – время преобразования;

$k$  – коэффициент передачи;

$U, \frac{dU}{dt}$  – входной сигнал и его производная;

$n$  – относительная величина входного сигнала;

$m$  – скорость изменения сигнала;

$\tau$  – длительность временного интервала в преобразователе;

$N$  – цифровой код на выходе преобразователя;

$\delta$  – величина относительной ошибки.

При подаче на вход синусоидального входного сигнала

$$U = a \sin \omega t,$$

с амплитудой  $a \leq A$  и скоростью изменения

входного сигнала  $\frac{dU}{dt} = a \omega \cos(\omega \cdot t)$ ,  
максимальное значение

$$m = \frac{dU}{dt}$$

имеет место в момент перехода синусоиды через нуль.

Величина  $m$  – определяет апертурную ошибку преобразователя, т.е. ошибку за счет изменения сигнала за время преобразования аналоговой информации в цифровой код.

Для увеличения точности измерения в преобразователях механических величин величину апертурной ошибки  $\delta a = \frac{2m}{k}$  необходимо ограничивать на уровне одного разряда преобразователя, т.е.

$$\frac{2m}{k} \leq \frac{1}{2^{nk} - 1}.$$

При подаче на вход синусоидального входного сигнала круговая частота должна превышать значения

$$\omega \leq \frac{f_{TЧ}}{2(2^{nk} - 1)^2},$$

при этом величина относительной апертурной ошибки не будет, превышает единицы младшего разряда преобразователя аналоговой информации в цифровой код. Величина скорости

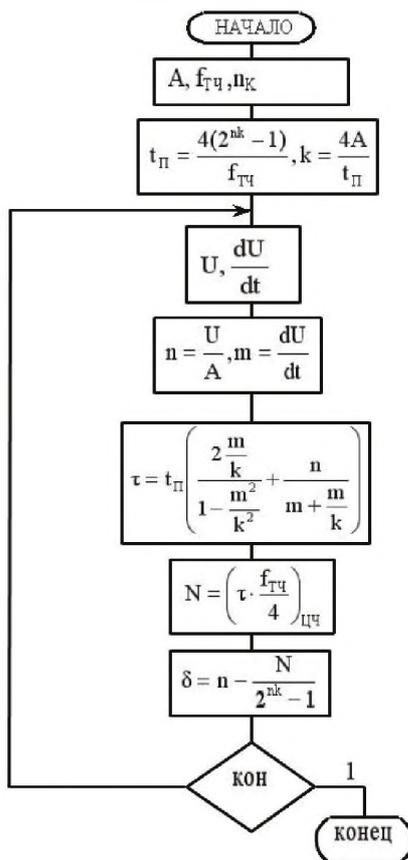
$$\frac{dU}{dt} \leq \frac{k}{2(2^{nk} - 1)}$$

при этой ошибке не будет больше единицы младшего разряда.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке аналого-цифровых преобразователей, высокоточных измерительных систем применяемых в системах стабилизации и навигации подвижных объектов [1].

### Литература

1. Кутуров А.Н., Кирмель А.Э. Гиригометр. АС №1677642, опубл. 15.09.91. Бюл. № 34.
2. Сурков В.В., Сухинин Б.В., Ловчаков В.И., Соловьев А.Э. Аналитическое конструирование оптимальных регуляторов по критериям точности, быстродействию, энергосбережению. Тула: ТулГУ, 2005. 300с.
3. Майоров С.А., Новиков Г.И. Принципы организации цифровых машин. Л.: Машиностроение, 1974. 386 с.
4. Изерман Р. Цифровые системы управления. М.: Мир, 1984. 360с.



**Рис. 3.** Алгоритм работы преобразователя аналог-код на макроуровне

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.773.5

## СИСТЕМА ТРАНСЛЯЦИЙ ПРЕЗЕНТАЦИЙ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ НАД ПРОТОКОЛОМ HTTP

### LIVE STREAMING SYSTEM OVER HTTP

#### Игорь Викторович Лобов

кандидат физико-математических наук  
старший научный сотрудник  
Институт физики высоких энергий  
НИИЦ «Курчатовский институт»  
Адрес: 142281, Московская обл.,  
г. Протвино, площадь Науки, дом 1  
Тел.: 8(915)000-92-84  
E-mail: lobov@ihep.ru

#### Владислав Георгиевич Готман

младший научный сотрудник  
Институт физики высоких энергий  
НИИЦ «Курчатовский институт»  
Адрес: 142281, Московская обл.,  
г. Протвино, площадь Науки, дом 1  
Тел.: 8(915)149-34-90  
E-mail: vladislav.gotman@ihep.ru

#### Аннотация

В работе описана система трансляции презентаций в реальном времени, реализованная на базе метода опережающей загрузки медиапотока над протоколом HTTP. В качестве контейнера медиапотока использовался открытый формат Ogg с кодеками theora и vorbis. Система трансляции презентаций представляет собой распределенный программный комплекс, состоящий из одного или нескольких кодировщиков медиапотока, ретранслятора и клиентской части. Кодировщик медиапотока преобразует данные от источника медиаданных (камера, экран компьютера, микрофон) и передает их подключившимся клиентам через Ретранслятор. Клиентская часть представляет собой набор web-страниц. Приведена структурная схема, описаны компоненты системы трансляции и этапы ее внедрения. Обсуждены результаты эксплуатации, выявленные проблемы и методы их решения.

**Ключевые слова:** потоковая трансляция, опережающая загрузка, медиапоток, Ogg, theora, vorbis.

#### Summary

The live streaming system based on the progressive download method over HTTP has been considered. The system utilizes Ogg multimedia container format with theora and vorbis codecs. The system presents oneself as distributed software, which consists of one or more Coders for media stream, a Retranslator and a client part. The media stream Coder transforms media data from source (web or ip cam, computer screen, microphone) and passes it to clients through the Retranslator. The client part is a set of web-pages. A general scheme, main components and implementation phases of live streaming system has been featured. The results of running, identified problems and methods for their solution were discussed.

**Keywords:** live streaming, progressive download, Ogg, theora, vorbis.

#### Введение

В настоящее время в мире приобрели широкую популярность трансляции презентаций в реальном времени в сети интернет над протоко-

лом HTTP. В работе [1] описывается два разных подхода к реализации технологий трансляций презентаций в реальном времени. Одним подходом является технология активной загрузки

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

клиентом небольших фрагментов презентации с последующим беспроводным их воспроизведением. Примерами реализации этого подхода являются технологии Apple HTTP Live Streaming (HLS) [2], Adobe HTTP Dynamic Streaming (HDS) [3], Microsoft Smooth Streaming [4], MPEG-DASH [5]. На ином подходе основывается описанная в работе [1] технология

организации живой потоковой трансляции над протоколом HTTP методом опережающей загрузки медиапотока формата Ogg [6]. Эта технология предложена в работе [7], ее идея состоит в пассивном приеме клиентом медиапотока от сервера методом опережающей загрузки. Прототип системы трансляций презентаций в реальном времени на основе этой технологии был представлен на конференции RuPAC [8].

В настоящей статье описывается результат трехлетней работы по развитию прототипа и превращения его в работоспособную систему трансляций реального времени, работающей на базе технологии опережающей загрузки. Система трансляций представляет собой распределенный программный комплекс, функционирующий на одном или нескольких компьютерах. Система трансляций применима для решения различных задач «диспетчерского» класса, а именно: трансляций лекций, докладов, конференций, мониторингов удаленных процессов, диспетчерской связи между удаленными пользователями в реальном времени.

### Общая схема системы трансляции презентаций в реальном времени

Система трансляции презентаций – это распределенный комплекс программного обеспечения, позволяющий создавать, кодировать (сжимать), транслировать и просматривать медиапотоки. Компоненты системы, выполняющие эти функции, можно запускать как на одном персональном компьютере, так и на разных. Система состоит из трех базовых частей:

- кодировщик медиапотока;
- ретранслятор;
- набор расположенных на web-сервере страниц для выбора и просмотра презентации клиентом.

Координация совместной работы базовых частей обслуживается с помощью СУБД SQL [9].

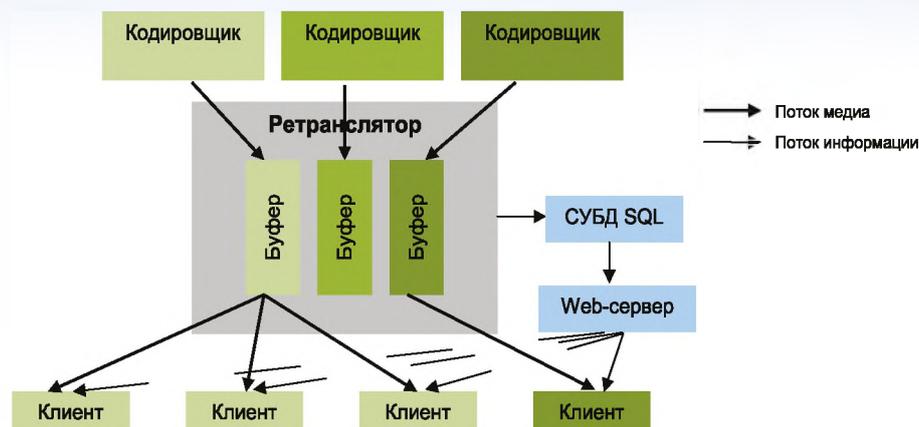


Рис. 1. Структура системы трансляции презентаций

На рисунке 1 изображена структура системы трансляции презентаций для случая трех презентаций, просматриваемых четырьмя клиентами. Одинаковым цветом изображены компоненты, относящиеся к одному медиапотoku.

*Кодировщик медиапотока* – программа, которая принимает аудиосэмпы и видеокдры с источника медиаданных, кодирует их кодеками и инкапсулирует в медиаконтейнер. Полученный медиапоток отправляется на Ретранслятор по локальной сети или по сети интернет. Источником видео данных могут быть ip- или веб-камера, а также экран компьютера. Источником аудио данных могут быть камера со встроенным микрофоном, подключенный к компьютеру микрофон или выходной канал звуковой карты компьютера (т.е. звук, выводимый на колонки).

*Ретранслятор* – программа, которая принимает от Кодировщика медиапоток и отправляет его клиентам. К Ретранслятору могут одновременно подключиться несколько Кодировщиков. После начала приема медиапотока от Кодировщика Ретранслятор может совершать передачу этого потока клиентам. Один медиапоток могут получать несколько клиентов. Каждый медиапоток имеет свой URL для подключения к нему клиента.

*Web-страница* доступных для просмотра презентаций формируется динамически, основываясь на информации из БД SQL. Информация о состоянии подключенных к Ретранслятору медиапотоков отражается в базе данных. На основании этой информации клиент получает список трансляций презентаций, в который входят название презентации и небольшое preview-изображение. После того, как клиент выберет для просмотра одну или несколько презентаций, проигрыватель клиента получит из базы данных URL выбранных медиапотоков и начнет их воспроизведение.

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

## Описание базовых частей системы трансляции презентаций в реальном времени

### Программа кодировщик медиапотока

Кодировщик медиапотока (КМ) – это программа для приема аудио/видео медиаданных (сэмплов / кадров) с различных устройств, их кодирования и инкапсулирования в медиаконтейнер. В качестве контейнера был выбран формат Ogg с кодеками theora [10] для видео и vorbis [11] для аудио. Формат Ogg является однопроходным (для воспроизведения текущего медиа нет необходимости возвращаться к предыдущим элементам потока) и применим для организации потоковых трансляций методом опережающей загрузки. Единицей потока Ogg является страница. В первых двух страницах хранится заголовок, содержащий метаданные всего потока, а в последующих страницах содержатся медиаданные. Метаданные потока необходимы для корректного воспроизведения и декодирования медиаданных.

КМ отправляет поток Ogg на Ретранслятор по локальной сети или сети интернет. Схема взаимодействия КМ с Ретранслятором изображена на рисунке 2. С помощью TCP-соединения КМ подключается к Ретранслятору, сообщает ему первичную информацию:

1. название трансляции;
2. тип потока (аудио/видео, аудио и видео);
3. качество потока (высокое/среднее/низкое);
4. размеры видео изображения (ширина и высота);

и передает заголовок потока Ogg (метаданные потока).

В ответ Ретранслятор посылает подтверждение, после чего КМ начинает отсылать медиаданные (страницы Ogg). Вперемежку с медиаданными периодически с интервалом в несколько секунд, КМ посылает preview-изображение (отдельные незакодированные кадры презентации в низком разрешении) для возможности предпросмотра потока клиентом на странице выбора презентаций.

### Ретранслятор

Ретранслятор – это программа, принимающая медиапотоки от КМ и производящая множественную пересылку этих потоков подключающимся клиентам. К Ретранслятору могут подключиться несколько КМ одновременно. Сразу после начала приема потока от КМ, Ретранслятор может начать ретрансляцию этого потока клиентам. Одну трансляцию презентации могут одновременно просматривать несколько клиентов. Главная особенность Ретранслятора заключается в том, что он игнорирует структуру при-

Кодировщик  
медиапотока

Ретранслятор

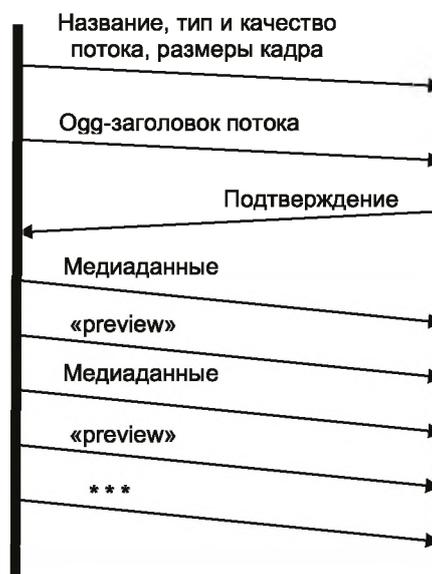


Рис. 2. Схема взаимодействия Кодировщика и Ретранслятора

нимаемых от КМ медиаданных и рассматривает их как последовательность байт. Ретранслятор может работать с любым форматом потока т.к. он не зависит ни от используемых кодеков, ни от форматов медиаконтейнера используемых в кодировщике трансляции. Единственным ограничением на формат медиаконтейнера ретранслируемого потока является то, что формат медиаконтейнера должен быть однопроходным – сначала должны поступить метаданные потока, а потом медиаданные.

Для каждого подключающегося КМ Ретранслятор создает два буфера: буфер метаданных для хранения заголовка потока и буфер FIFO для хранения медиаданных. Ретранслятор взаимодействует с Кодировщиками и клиентами с помощью механизма TCP-сокеты. Каждому подключившемуся КМ предоставляется отдельный сокет. Каждый КМ-сокет порождает сокет «listen» для клиентов этой трансляции. Клиент подключается к сокету «listen», после чего ретранслятор создает клиенту отдельный сокет «data», на который отправляет сначала заголовок потока из буфера метаданных, а потом поступающие в буфер FIFO от КМ медиаданные, начиная с самых свежих.

Для каждого подключенного КМ Ретранслятор создает два буфера – буфер метаданных потока и кольцевой буфер FIFO (рисунк 3). При подключении КМ Ретранслятор записывает заголовок потока в буфер метаданных, после чего начинает заполнять кольцевой буфер FIFO приходящими от КМ медиаданными. Кольцевой

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

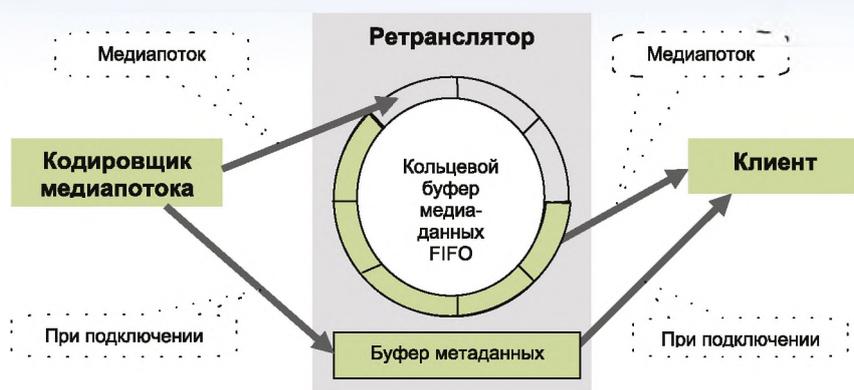


Рис 3.Схема передача потока от кодировщика клиентам

буфер FIFO содержит TCP-пакеты, которые поступают от КМ, причем TCP-пакеты никак не связаны со структурой медиаданных, их размер задается из соображений оптимальности передачи данных по сети интернет. Вновь подключившемуся клиенту Ретранслятор вначале передает заголовок потока из буфера метаданных, а затем начинает передавать медиаданные из кольцевого буфера FIFO, начиная с последнего загруженного в FIFO TCP-пакета.

Структурной единицей поступающих от КМ кодированных медиаданных является страница Ogg. КМ передает одну страницу Ogg на Ретранслятор в виде множества TCP-пакетов (от нескольких десятков до нескольких сотен в случае размера TCP-пакета 512 байт) Ретранслятор хранит пакеты в буфере FIFO, не зная, где заканчивается одна страница и где начинается другая. Поскольку Ретранслятор вновь подключившемуся клиенту начнет передавать пакеты из FIFO, начиная с последнего загруженного туда пакета, то в большинстве случаев клиент первой получит от ретранслятора неполную страницу Ogg (без ее начала). Клиент отбросит ее, и начнет воспроизводить медиаданные, начиная со следующей полученной полной страницы. Этот процесс схематично изображен на рисунке 4.

Кодировщик медиапотока пересылает заголовок потока Ogg и последующие Ogg-страницы с медиаданными на Ретранслятор. Клиент 1 подключается в момент когда Кодировщик медиапотока посылает Ретранслятору страницу С.2. Клиент 1 получает от Ретранслятора сначала заголовок, а потом медиаданные, начиная с неполной страницы С.2. Клиент 1 отбросит страницу С.2 и начнет воспроизведение медиапотока начиная с С.3. Аналогично для клиента 2.

### Клиент

Программное обеспечение для клиента представляет собой набор web-страниц, распо-

ложенных на web-сервере. Web-страница доступных клиенту трансляций формируется динамически, основываясь на информации об имеющихся презентациях в БД. Клиент просматривает со своего браузера web-страницу и видит список доступных для воспроизведения трансляций. Список состоит из preview и названия презентации. Для того чтобы клиент имел возможность в реальном времени

выбрать интересующую его трансляцию, preview-изображение периодически обновляется. После выбора одной или нескольких презентаций клиент переходит на страницу с HTML5-проигрывателем и начинает воспроизводить трансляцию. Воспроизведение начинается следующим образом (рисунк 5). При выполнении кода тэга <video> HTML5 [12] браузер клиента отправляет запрос GET [13] на Ретранслятор. Ретранслятор отправляет ответ клиенту, сообщая последнему формат медиапотока. После этого клиент начинает принимать поток, сначала заголовок, а затем медиаданные, одновременно с этим воспроизводя поток методом опережающей загрузки. Ретранслятор отправляет медиаданные клиенту без остановки, по ходу их поступления от КМ. При этом клиент производит прием медиа пассивно.

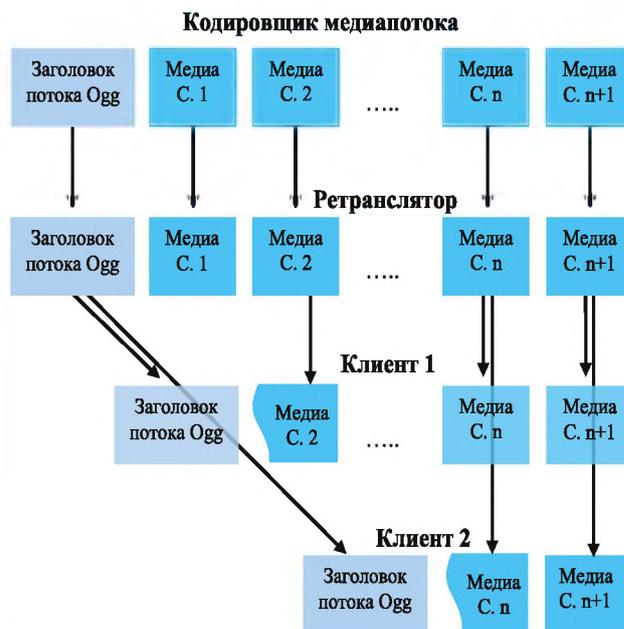


Рис. 4. Схема передачи одного медиапотока двум клиентам

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ



Рис. 5. Схема взаимодействия клиента и Ретранслятора

### База данных SQL

База данных SQL служит для организации связи между ретранслятором и клиентами. При подключении КМ Ретранслятор помещает в БД полученную от КМ первичную информацию (название трансляции, качество потока, тип потока, размеры экрана). При завершении трансляции первичная информация удаляется из БД. Клиент использует эту информацию для выбора интересных его презентаций.

### Разработка и внедрение системы

Цель первого (тестового) этапа разработки системы заключалась в проверке работоспособности предложенной в работе [7] технологии организации живой потоковой трансляции над протоколом HTTP методом опережающей загрузки медиапотока формата Ogg. С этой целью система была применена для решения задачи трансляции докладов, лекций, конференций в Институте физики высоких энергий им. А. А. Логунова. Использовались следующие источники медиаданных:

- Две IP-камеры D-link DCS-3430, одна из них была направлена на докладчика, вторая в зал. Камеры использовались как источники видео (MJPEG [14]) и аудио (PCM [15]), транспортный уровень организован на базе протокола RTP [16].

- Персональный компьютер, отображающий слайды презентации на проектор, использовался как источник видео (последовательность копий экрана).

Структурная схема системы трансляций презентаций представлена на рисунке 6. Три Кодировщика медиапотока, принимают медиа-

данные. Один КМ установлен на персональном компьютере, два других КМ функционируют вместе с Ретранслятором на удаленном сервере. Ретранслятор помещает информацию о подключенных трех медиапотоках в БД, принимает кодированные медиа и отдает их клиентам. Клиенты загружают с web-сервера web-страницы и исполняют их код. Получив список трансляций презентаций, клиенты выбирают нужные презентации для просмотра и воспроизводят их синхронно.

Основным положительным итогом внедрения является то, что предложенная в работе [7] технология оказалась реализуемой и работоспособной. Одновременно к одной презентации подключалось до 20 человек. Минимальная задержка трансляции презентации от актуального времени оказалась в диапазоне 250-400 мс, что вполне приемлемо для связи между двумя пользователями в реальном времени.

В процессе разработки и тестирования системы были выявлены следующие проблемы:

1. Нестабильный поток аудиосэмплов и видеок кадров от источника медиаданных приводил к нарушению синхронизации между аудио и видео.

2. В процессе воспроизведения презентации в браузере клиента иногда происходило необратимое увеличение задержки воспроизведения презентации от актуального времени до значения в несколько секунд.

Далее эти проблемы обсуждаются более подробно.

### Нестабильный поток аудиосэмплов и видеок кадров

Выяснилось, что с используемых источников видео (аудио) сигналов видеок кадры (аудиосэмплы) идут неравномерно. Несоответствие меж-

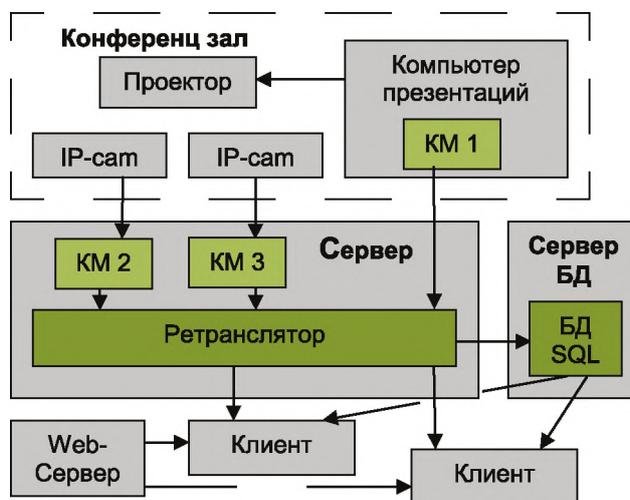


Рис. 6. Структурная схема системы трансляций презентаций

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ду реальной частотой кадров (дискретизации аудио) и заявленным значением этой частоты может достигать до 1%. Несоответствие частоты приводит к неправильному времени отображению кадров (сэмпов). Дело в том, что при воспроизведении клиентом медиа формата Ogg, видеокadres и аудиосэмпы отображаются в определенное для этого кадра (сэмпла) время. Кадры и сэмпы маркируются порядковым номером кадра (сэмпла) в потоке. Время отображения конкретного кадра или сэмпла вычисляется как произведение этого порядкового номера и частоты кадров в секунду (или частоты дискретизации). При несоответствии в 1% и заявленной частоте кадров в 25 в секунду рассинхронизация аудио и видео за 10 минут достигает величины в 6 секунд.

Эта проблема решена путем промежуточной буферизацией медиапотока Кодировщиком медиапотока. Например, неравномерно поступающие на КМ видеокadres сохраняются в промежуточном буфере. Из этого буфера они извлекаются с фиксированной частотой, кодируются, инкапсулируются в медиаконтейнер Ogg и отправляются на Ретранслятор.

### Необратимое увеличение задержки воспроизведения презентации

При инициализации подключения к трансляции презентации клиент загружает себе некоторый буфер, обычно его длина приблизительно составляет 200-300 мс. Эта величина входит в задержку воспроизведения презентации на клиенте от актуального времени. Этот буфер необходим для плавного воспроизведения медиа при кратковременных снижениях качества сети. При кратковременной задержке в передаче медиа по сети интернет у клиента будет возможность не прерывать воспроизведение презентации, а отображать уже загруженное медиа из буфера. Если у клиента скорость загрузки медиа будет меньше скорости воспроизведения этого медиа, весь этот буфер быстро (за время длительности этого буфера) иссякнет и трансляция прервется для накопления нового буфера. В этом случае браузер клиента самостоятельно расширяет этот буфер до 2-3 секунд, что приводит к задержке воспроизведения трансляции от актуального времени на длину этого буфера. Браузер в дальнейшем сохраняет размер этого буфера и не существует метода задать явно его размер. Таким образом, задержки в загрузке медиа приводят к необратимому увеличению задержек воспроизведения презентации от актуального времени. Однако существует способ уменьшения задержки воспроизведения пре-

зентации до первоначального значения в 200-300 мс, путем увеличения скорости воспроизведения (playbackRate) до 1.1. При этом буфер будет уменьшаться. Когда длина буфера достигнет требуемого значения, необходимо вернуть скорость воспроизведения в 1.0, иначе произойдет опустошение буфера. Если скорость загрузки к этому моменту не стала больше, чем скорость воспроизведения то ситуация с прерыванием трансляции презентации повторится вновь.

### Заключение

В настоящей работе описаны результаты реализации технологии [7] организации трансляции в реальном времени методом опережающей загрузки медиапотока формата Ogg над протоколом HTTP. Реализация представляет собой распределенную систему трансляций презентаций в реальном времени, состоящую из независимых компонентов, которые могут работать на разных узлах сети. Система состоит из трех базовых частей:

1. кодировщика медиапотока;
2. ретранслятора;
3. набора web-страниц для выбора и просмотра презентации клиентом, расположенных на web-сервере.

Кодировщик медиапотока принимает аудиосэмпы и видеокadres с источника медиаданных, кодирует и инкапсулирует в медиаконтейнер. Полученный медиапоток по сети интернет отправляется на ретранслятор. Ретранслятор принимает медиапотоки от кодировщиков и передает их подключившимся клиентам. Источниками аудиосэмпов и видеокadres могут быть как персональные компьютеры (последовательность копий экрана), так и (web/ip) камеры. Функционирование системы трансляций презентаций координируется посредством базы данных SQL.

В качестве формата медиапотока кодировщика был выбран открытый формат медиаконтейнера Ogg с кодеками theora и vorbis. Формат Ogg является форматом медиаконтейнера, ориентированный на потоковое (однопроходное) воспроизведение. Формат медиаконтейнера Ogg имеет структурное разделение на заголовок (метаданные) и сжатые кадры и аудиосэмпы (медиаданные). Этот формат поддерживается тэгом <video> HTML5, тем самым система трансляций презентаций доступна клиентам, использующим различные браузеры (Google Chrome, Mozilla Firefox, Opera) и операционные системы (Windows, Linux, Android). Задержка трансляции презентации на клиенте от актуального времени составляет 250-400 мс. В сравнении с этой

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

величиной, лидирующие технологии трансляций презентаций в реальном времени (Apple HLS, Adobe HDS, Microsoft Smooth Streaming, MPEG DASH) имеют минимальную задержку в 2 секунды [1].

В первом этапе внедрения система трансляций презентаций была использована для трансляции докладов, лекций, конференций в Институте физики высоких энергий им. А.А. Логунова. В следующих этапах планируется расширить набор источников медиаданных с целью применения системы для решения задачи мониторинга технологических процессов на удаленных персональных компьютерах. Задержка воспроизведения презентации позволяет применить систему для организации двух и более сторонней связи между удаленными пользователями.

### Литература

1. Лобов. И.В., Готман В.Г. Использование контейнера Ogg для организации потоковой трансляции в реальном времени над протоколом HTTP методом опережающей загрузки // Информационные технологии. 2018. №2. С. 87-96.
2. Pantos R., May W. HTTP Live Streaming, draft-pantos-http-live-streaming-18. Apple Inc., 2015, 49 p.
3. HTTP Dynamic Streaming Specification Version 3.0 FINAL. Adobe Systems Incorporated, 2013. 31 p.
4. Smooth Streaming Protocol. [MS-SSTR] - v20160714. Microsoft Corporation, 2016, 64 p.
5. ISO/IEC 23009-1. Information technology – Dynamic adaptive streaming over HTTP (DASH) – Part 1: Media presentation description and segment formats. Second edition, 2014, 144 p.
6. Pfeiffer S. The Ogg Encapsulation Format Version 0. Request for Comments: 3533, 2003, 15 p.
7. Лобов. И.В., Готман В.Г. Трансляция мультимедиа в реальном времени над протоколом HTTP методом опережающей загрузки // Технологии и средства связи. 2016. №5. С. 36-40.
8. Lobov I., Gotman V. Media server for video and audio exchange between the U-70 accelerator complex control rooms // Proceedings of RuPAC2014. RUPAC. Obninsk. 2014. P. 368-388.
9. ISO/IEC 9075-2:1999(E). Database Language SQL — Part 2: Foundation (SQL/Foundation). 1999, 1121 p.
10. Theora Specification. Xiph.Org Foundation, 2011, 196 p.
11. Vorbis I specification. Xiph.Org Foundation, 2015, 74 p.
12. HTML Living Standard. The Web Hypertext Application Technology Working Group, 2017, 1177 p.
13. Fielding R., Gettys J. Hypertext Transfer Protocol -- HTTP/1.1. Request for Comments: 2616, 1999, 114 p.
14. Berc L., Fenner W. RTP Payload Format for JPEG-compressed Video. Request for Comments: 2435, 1998, 27 p.
15. Salsman J., Alvestrand H. The Audio/L16 MIME content type. Request for Comments: 2586, 1999, 5 p.
16. Schulzrinne H., Casner S. RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications. Request for Comments: 3550, 2003, 104 p.



# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 533.6

## УГОЛ, ОБРАЗОВАННЫЙ СКРЕЩИВАЮЩИМИСЯ ВЕКТОРАМИ УСКОРЕНИЙ И СКОРОСТЕЙ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ БЫСТРОМАШУЩЕГО КРЫЛА

## THE ANGLE FORMED BY SKEW ACCELERATION VECTORS AND SPEEDS IN THE BOUNDARY LAYERS OF SWIFT-WAVING WINGS

**Темир Хусаинович Ахмедов**

*кандидат технических наук*  
старший научный сотрудник  
МОУ «ИИФ»

Адрес: 142210, Московская область,  
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: 8 (4967) 35-31-93

**Алина Сергеевна Пономарёва**

*кандидат физико-математических наук*  
старший научный сотрудник  
МОУ «ИИФ»

Адрес: 142210, Московская область,  
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: 8 (4967) 35-31-93

### Аннотация

В статье рассматриваются структура потока, обтекающего быстромашущее крыло насекомого, а также углы отклонения векторов относительных ускорений и скоростей частиц воздуха в пограничном слое быстромашущего крыла при его махово-супинационном движении.

**Ключевые слова:** пограничный слой, быстромашущее крыло, углы между скрещивающимися векторами ускорений и скоростей частиц воздуха.

### Summary

The article deals with the structure of the flow encircling the swift-waving insect's wing as well as deflection angles of the vectors of relative acceleration and speeds of air portions in the swift-waving wing boundary layer during its swing-supination movement.

**Keywords:** boundary layer, swift-waving wing, angles between skew vectors of accelerations and speeds of air portions.

### Структура потока, обтекающего быстромашущее крыло

Компьютерное моделирование позволило установить общую структуру потока, обтекающего быстромашущее крыло, и основные закономерности течения частиц воздуха в пограничном слое этого крыла [3].

Из теории пограничного слоя известно, что при стационарной картине обтекания профиля крыла частицы воздуха, перемещаясь от передней к задней его кромке, переходят из области с малым давлением в область повышенного давления. Для такого перемещения необходим достаточный запас кинетической энергии. Однако вследствие значительных сил трения происходит торможение частиц, что может привести к отрыву пограничного слоя. При этом точка отрыва будет перемещаться от задней кромки крыла к его передней кромке. За ней появляется обратное течение. В связи с этим возникает задача создания таких условий, при которых

точка отрыва должна перемещаться к задней кромке крыла. Известны два способа решения данной задачи: повышение кинетической энергии частиц пограничного слоя (сдув) и понижение давления в кризисной зоне (отсос).

Но в природе создан иной способ решения этой задачи. Он применяется на крыльях быстромашущих насекомых и основан на использовании инерционных сил, которые, как известно, возникают при махово-супинационных движениях крыльев и способны совершать работу по перемещению частиц воздуха. В рассматриваемом случае благодаря инерционным силам быстромашущего крыла и силам вязкого трения энергия в пограничном слое передается от одного слоя к другому.

При изучении течений в пограничном слое быстромашущих крыльев следует также учесть особенность покрова их поверхностей, заключающуюся в наличии микробразований, создающих четко выраженный геометрический рису-

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

нок канавок, которые структурно организованы и «утонули» в пограничном слое [7].

В динамике течения над быстромашущим крылом многослойно, оно выглядит следующим образом. Непосредственно на поверхности крыла в микрорельефах находится ламинарный пограничный слой. Направление течений в нем определяется вязкостью и инерционными силами, модули которых увеличиваются в направлении от основания к вершине крыла и его задней кромке. Действие этих сил приводит к непрерывному отбрасыванию частиц воздуха к периферии крыла, предупреждая отрыв пограничного слоя. Над этим слоем расположен тонкий слой, турбулизированный ворсинками передней кромки крыла. Этот слой является своеобразным лифтом между внешним течением и нижним ламинарным пограничным слоем.

В итоге, данное явление может рассматриваться как действие механизма стабилизации пограничного слоя, напоминающее функционирование механизмов сдува и отсоса пограничного слоя с поверхности крыла при стационарной картине течения.

### Углы отклонения направлений течений воздуха между различными слоями пограничного слоя быстромашущего крыла при его махово-супинационном движении

Расчетным путем было установлено, что направления векторов скоростей и ускорений на разных высотах пограничного слоя быстромашущих крыльев имеют разные направления [1, 2].

На рисунке 1 изображены направления векторов ускорений и скоростей частиц воздуха в пограничном слое быстромашущего крыла, а также углы, характеризующие ориентирование этих векторов. Рассматривается новый расчетный кинематический параметр: угол  $\eta$  между проекциями на плоскость крыла в любой его точке скрещивающихся векторов ускорений и скоростей частиц воздуха, расположенных на разных высотах пограничного слоя.

На рисунке введены следующие обозначения:

*стрелка А* – направление векторов ускорений частиц воздуха на нижней границе пограничного слоя крыла;

*стрелка В* – направление векторов скоростей частиц воздуха на верхней границе пограничного слоя крыла;

$\alpha_{ij}$  – угол между осью, параллельной продольной оси крыла, и вектором ускорений частиц воздуха в рассматриваемой точке крыла;

$\beta_{ij}$  – угол между осью, параллельной продоль-

ной оси крыла, и вектором скорости частиц воздуха в рассматриваемой точке крыла;

$\eta$  – угол, образованный между скрещивающимися вектором ускорения частиц воздуха на поверхности крыла и проекцией на плоскость крыла вектора скорости частиц в пограничном слое.

Происхождение угла  $\eta$  объясняется следующим обстоятельством. Угол  $\alpha_{ij}$  определяет направление ускоренного течения на поверхности крыла в сторону *стрелки А*. Но выше пограничного слоя существует иное течение, в котором отсутствуют инерционные силы и силы вязкого трения. На внешней границе пограничного слоя (поскольку маховое движение крыла – вращение) относительное движение частиц происходит иначе, а именно: в направлении *стрелки В*. В данном случае стрелка В находится на верхней границе пограничного слоя, а *стрелка А* – на его нижней границе. Угол  $\eta$  образуется скрещивающимися линиями, образованными в этих направлениях.

При проектировании летательных аппаратов за основу могут быть приняты формы крыльев природных аналогов. В этом случае для сохранения динамического подобия направления А и В во всех точках и высотах пограничных слоев природного аналога и летательного аппарата должны быть аналогичны.

Физический смысл этого условия заключается в следующем. Если бы не было вязкости, частицы воздуха точно так же, как во внешнем потенциальном течении, перемещались бы в направлении *стрелки В*. Но на поверхности крыла рассматриваемая частица движется с ускорением в направлении *стрелки А*. Из этого следует, что рассматриваемый параметр – угол  $\eta$  – может стать не только критерием динамического подобия. Он может использоваться как один из основных параметров, характеризующих строение насекомого, в частности, жилкование его крыла.

Для биологических объектов комара и мухи различны не только частоты маховых движений, но и соотношения частот супинационных и маховых движений: для комара это соотношение равно 1,5 (при частоте маховых движений крыльев  $f=500$  Гц, угловых скоростях вра-

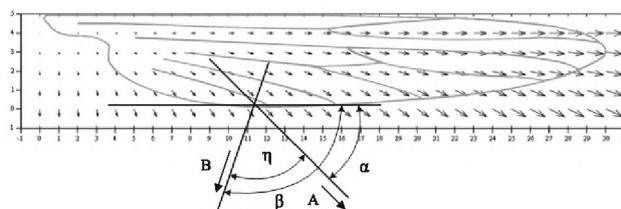


Рис. 1. Углы, характеризующие ориентацию векторов ускорений и скоростей частиц воздуха в пограничном слое быстромашущего крыла

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

щения крыльев  $\omega_m = 1667$  рад/с,  $\omega_c = 2500$  рад/с, для мухи – 2,14 (при частоте маховых движений крыльев  $f = 251$  Гц,  $\omega_m = 840$  рад/с,  $\omega_c = 1800$  рад/с). Длины крыльев примерно одинаковы. Поэтому у комара нагрузки на нервную систему и шарнирные узлы крепления крыла к телу больше, чем у мухи. Но у мухи крыло нагружено на более сложную разрушающую нагрузку – кручение. В перспективе возможно создание энтомоптеров с крыльями двух типов: с относительно быстромашущими узкокрыльями, как у комара, и относительно медленно машущими ширококрыльями, как у мухи. При этом обязательно в каждом случае сохранение равенства соответствующих углов  $\eta$  для крыльев аппаратов и природных прототипов.

Показателен тот факт, что отношения частот при супинании и махе крыльев для рассматриваемых насекомых различны. Соответственно отличаются и углы  $\eta$ . Эти отношения не случайны, они найдены перебором различных вариантов. Отклонения частот от этих чисел приводят к тому, что расчетные течения «не вписываются» в канавки, «начертанные» в природе на крыльях насекомых. В результате увеличение тяги при относительно узких крыльях может происходить только за счет увеличения частоты их маховых движений, а при широких – увеличением угловой скорости вращения крыла во время супинации.

Изменение расчетной величины угла  $\eta$  по высоте рассматриваемого пограничного слоя осложняет вопрос «нарезания» канавок на поверхности крыла. Поэтому следует различать теоретические значения этого угла для каждого рассматриваемого слоя и те углы, которые рассматриваются на реальных канавках крыльев насекомых. С помощью расчетных углов можно более детально изучить физические процессы, происходящие в самом пограничном слое. Но в природе этот вопрос решен иначе – в пользу наиболее оптимального варианта рисунков сети канавок. Следовательно, характеристики конкретного крыла насекомого следует изучать по реальной картине расположения канавок на поверхности крыла. Следует иметь в виду, что сети канавок могут отличаться и в зависимости от пола насекомых, их возраста.

Значимость данного параметра заключается также в том, что он может быть использован при классификации крыльев насекомых и летательных аппаратов.

В стационарной аэродинамике используются критерии подобия. Это числа Рейнольдса, Эйлера, Струхала и другие. Соответственно, совокупность углов  $\eta$  по всем слоям пограничного слоя

или на поверхности крыла может в перспективе использоваться как критерий подобия в нестационарной аэродинамике быстромашущих крыльев насекомых и летательных аппаратов.

В палеонтологии вычисление углов  $\eta$  позволит по небольшому фрагменту крыла ископаемого насекомого воссоздать форму крыла и оценить некоторые особенности его морфологии, анатомии, физиологии животного.

Возможны следующие варианты использования в технике крыльев различной формы. Насекомые оказались более маневренными и грузоподъемными, чем технические летательные аппараты. Так, например, комар с относительно узкими крыльями напивается крови, масса которой в 3-5 раз больше массы комара [4, 5], а бражник, имея широкие крылья и обладая способностью зависать над цветком, может осуществлять маневренный полет со скоростью до 54 км/час [6]. Поэтому для десантирования грузов с самолетов или космических аппаратов могут использоваться аппараты с более грузоподъемными крыльями, подобными по форме крыльям комара. А для совершения маневренного скоростного полета, например, при проведении разведки, для аппаратов более предпочтительны крылья, по форме подобные крыльям бражника, мухи сирфиды.

### Литература

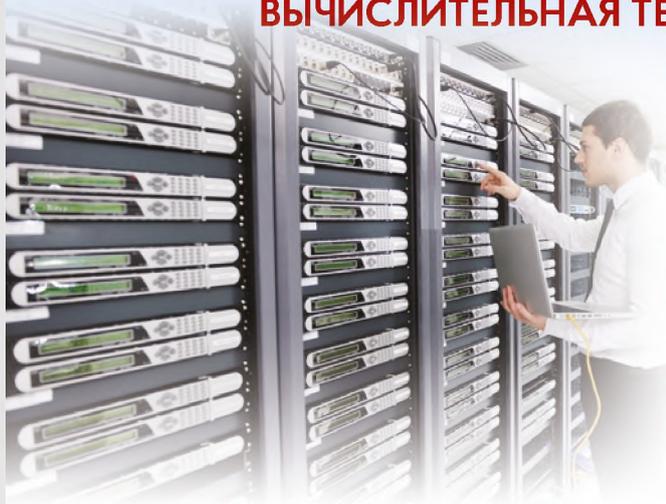
1. Ахмедов Т.Х. Теоретические основы движителя летательных аппаратов с быстромашущими крыльями. Часть 1. Физическая, аэродинамическая, механическая модели. Расчет тяги и мощности движителя. Серпухов, 2009. 137 с.
2. Ахмедов Т.Х. Теоретические основы движителя летательных аппаратов с быстромашущими крыльями. Часть 2. Моделирование пограничного слоя на поверхности быстромашущего крыла. Серпухов, 2009. 236 с.
3. Ахмедов Т.Х., Пономарёва А.С. Компьютерное моделирование векторных полей ускорений и скоростей частиц воздуха в пограничном слое быстромашущего крыла // Известия «Института инженерной физики», 2009. №1(11). С. 20-23.
4. Бей-Биенко Г.Я. Общая энтомология. М.: Высшая школа, 1971. 487 с.
5. Кокшайский Н.В. Избранные труды. / Ред. состав Ю.Ф. Ивлев и др. М.: Товарищество научных изданий. КМК, 2008. 410 с.
6. Свидерский В.А. Полет насекомого. М.: Наука, 1980. 136 с.
7. Соколов В.Е., Бочарова-Месснер О.М. Адаптивные свойства эпителия и его производных. М.: Наука, 1979. С. 72-73, 96-97.

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.056: 061.68.50

## ОБНАРУЖЕНИЕ ОШИБОК В АРИФМЕТИКО-ЛОГИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ЭВМ

## DETECTION OF ERRORS IN ARITHMETIC AND LOGICAL DEVICES OF SPECIALIZED COMPUTERS OF INFORMATION- MEASURING SYSTEMS



**Владимир Захарович Волков**

адъюнкт  
филиал ВА РВСН имени Петра  
Великого (г. Серпухов)  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17  
Тел.: 8(915)326-56-40  
E-mail: svi-rv@mail.ru

### Аннотация

Предложена регулярная процедура адаптации алгебраического линейного кода для обнаружения ошибок в арифметико-логических устройствах процессоров бортовых систем управления авиационной техникой. Выявлены закономерности, определяющие соотношения между арифметико-логическими операциями и значениями контрольных разрядов линейного кода относительно данных операций, позволяющие сформулировать правила получения значений поправок к контрольным разрядам кода для обнаружения одиночных и двойных ошибок при минимальной информационной избыточности, аппаратных и временных затратах.

**Ключевые слова:** микропроцессор, микроконтроллер, корректирующий алгебраический линейный код, одиночные и двойные ошибки, информационные разряды, контрольные разряды, алгебраические операции, логические операции.

### Summary

A regular procedure is proposed for adapting the algebraic linear code for detecting errors in the arithmetic logic units of the information-measuring system processors. The regularities that determine the relationships between arithmetic logic operations and the values of the control bits of the linear code with respect to these operations are revealed, which allow to formulate rules for obtaining corrections to the code check values, for detecting single and double errors with minimal information redundancy, hardware and time costs.

**Keywords:** microprocessor, microcontroller, correcting algebraic linear code, single and double errors, information bits, check digits, algebraic operations, logical operations.

### 1. Введение и постановка задачи

Характерной особенностью систем управления (СУ) является использование специализированных ЭВМ.

Так как эффективность СУ в значительной степени характеризуется достоверностью информации, обрабатываемой в данных системах, то особую актуальность приобретает вопрос обеспечения достоверности функционирования ЭВМ (достоверности функционирования ариф-

метико-логических устройств процессоров при выполнении арифметических и логических операций) [7,8].

Необходимость контроля арифметических и логических операций, выполняемых в АЛУ процессора, объясняется тем, что в этом устройстве осуществляется наиболее сложное преобразование информации, являющееся завершающим этапом работы системы в целом.

В свою очередь, достоверность функциони-

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

рования ИИС устройств существенно зависит от выбранного метода обнаружения ошибок (обнаруживающей способности выбранного метода контроля информации и аппаратурных затрат необходимых для реализации данного метода).

Опыт эксплуатации электронных дискретных устройств показывает, что наиболее вероятным событием является возникновение в них одиночных и двойных ошибок [9,10,11,12].

При использовании встроенных средств контроля для нахождения одиночных и двойных ошибок достоверность функционирования определяется выражением [7]:

$$D_{\phi}(t) = \left[ P_{исх}(t)P_k(t) + P_1P_{обн1} [1 - P_{исх}(t)P_k(t)] + P_2P_{обн2} [1 - P_{исх}(t)P_k(t)] \right] P_{р.о}(t)$$

где  $D_{\phi}(t)$  – достоверность функционирования;

$P_{исх}(t)$ ,  $P_k(t)$ ,  $P_{р.о}(t)$  – соответственно вероятности безотказной работы исходной схемы, схемы контроля, решающего органа;

$P_{обн1}$ ,  $P_{обн2}$  – вероятности обнаружения одиночных (нечетных) и двойных (четных) ошибок, соответственно;

$P_1$ ,  $P_2$  – вероятность возникновения одиночных и двойных ошибок, соответственно.

Эффективным методом обнаружения ошибок в устройствах хранения информации и ошибок, возникающих при выполнении арифметических операций является организация контроля по модулю.

В таблице 1 представлены числовые значения вероятностей обнаружения ошибок для различных значений модуля  $q$  и кратности обнаруживаемой ошибки  $t$ .

**Таблица 1**

Вероятности обнаружения ошибок при контроле по модулю

$t$	$P_{обн}$			
	$q=3$	$q=5$	$q=7$	$q=11$
1	1	1	1	1
2	0,5	0,75	0,833	0,9

Достоинством контроля по модулю является небольшая информационная избыточность (относительно небольшое число проверочных разрядов) и возможность контроля арифметических операций.

Недостатком контроля по модулю является низкая обнаруживающая способность двойных ошибок, невозможность организации контроля логических операций АЛУ и большие аппаратурные и временные затраты, связанные с операцией деления для получения остатка, так как необходимо организовать переносы в пирамидальной схеме свертки, построенной на суммах.

Использование алгебраического линейного кода с кодовым расстоянием  $d=3$ , позволяет обнаруживать все одиночные и двойные ошибки. Недостатком использования алгебраического линейного кода является большая информационная избыточность (большие аппаратурные затраты связанные с хранением значений проверочных разрядов).

Следовательно, возникает противоречие: с одной стороны, необходимо повышать обнаруживающую способность встроенных средств контроля, а с другой стороны, это приводит к значительному увеличению информационной, аппаратурной и временной избыточности, что в свою очередь, приводит к снижению эффективности использования средств контроля.

Для разрешения выявленного противоречия необходимо повышать обнаруживающую способность средств контроля и вероятность их безотказной работы, или же сокращать аппаратурные затраты этих средств или одновременно улучшать данные показатели.

Для этих целей предлагается использовать алгебраический линейный код, обнаруживающий одиночные и двойные ошибки при минимальной информационной и аппаратурной и временной избыточности, представленный в работе [13].

В таблице 2 представлены значения вероятностей обнаружения двойных ошибок  $P_{обн2}$  и количество контрольных разрядов  $r$  при использовании предлагаемого кода, количество контрольных разрядов  $r_{Хэмминг}$  при использовании кода Хэмминга (алгебраического линейного кода с кодовым расстоянием  $d=3$ ), в зависимости от числа информационных разрядов  $k$ .

**Таблица 2**

Сравнительные характеристики предлагаемого кода

$k$	16	32	64	128	256	1024
$P_{обн2}$	0,9	0,94	0,95	0,977	-	-
$r$	3	4	4	5	5	6
$r_{Хэмминг}$	5	5	7	8	9	11

Рассматриваемый код, по сравнению контролем по модулю, при одинаковом числе проверочных разрядов, имеет большую обнаруживающую способность и минимальные временные затраты на обнаружение ошибок (требуется меньше времени, чем при организации проверки на четность), а по отношению к линейному коду с кодовым расстоянием  $d=3$ , при незначительном снижении вероятности обнаружения двойных ошибок, код имеет меньше проверочных разрядов (меньше аппаратурных затрат,



# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

### 3. Обнаружение и исправление ошибок при выполнении арифметических операций

Преимущественное распространение в современных вычислительных машинах имеют сумматоры параллельного действия, в которых передача чисел и образование суммы происходит одновременно для всех разрядов.

Рассмотрим основные положения метода контроля операции сложения на примере кодирования 12 информационных разрядов. В этом случае, при построении информационной матрицы, потребуется три столбца и четыре строки ( $z=7$ ), тогда  $r^*=3$ .

Проверочная матрица  $H$  для рассматриваемого кода имеет вид:

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

Проверки для формирования значений контрольных разрядов определяются выражением:

$$r_1 = y_3 \oplus y_6 \oplus y_7 \oplus y_8 \oplus y_9 \oplus y_{10} \oplus y_{11};$$

$$r_2 = y_2 \oplus y_4 \oplus y_5 \oplus y_8 \oplus y_9 \oplus y_{10} \oplus y_{11};$$

$$r_3 = y_1 \oplus y_4 \oplus y_5 \oplus y_6 \oplus y_7 \oplus y_{10} \oplus y_{11} \oplus y_{12}.$$

Допустим, требуется сложить два 12-разрядных числа:  $A=001\ 011\ 111\ 001$  и  $B=001\ 100\ 110\ 011$  (номера разрядов проставлены справа налево). При кодировании данных чисел предлагаемым методом получим кодовые наборы соответственно:

$$A_k = 001\ 011\ 111\ 001\ 000,$$

$$B_k = 001\ 100\ 110\ 011\ 100.$$

Сложение по  $mod\ 2$  значений контрольных разрядов и арифметическое суммирование значений информационных разрядов данных кодовых наборов, с учетом переносов, даст результат:

$$\begin{array}{r} 001\ 011\ 111\ 001\ 000 \\ + 001\ 100\ 110\ 011\ 100 \\ \hline S = 011\ 000\ 101\ 100\ 100. \end{array}$$

Для полученной суммы значений информационных разрядов, значения контрольных разрядов должны иметь соответственно значение: 010. Однако, сложение контрольных разрядов слагаемых по  $mod\ 2$  даст результат:

$$\begin{array}{r} 000 \\ + 001, \\ \hline S_{k\ mod\ 2} = 100 \end{array}$$

который отличается от правильного значения 010.

В связи с этим, для формирования правильных значений контрольных разрядов, возника-

ет необходимость определения поправки к значению контрольных разрядов  $S_{k\ mod\ 2}$ .

Правила формирования поправки, может быть получено на основе кодирования информации учитывающей все переносы, возникающие при сложении двух чисел.

Для рассматриваемого примера, при сложении информационных разрядов перенос единичных значений сигналов осуществляется во второй, третий, шестой, седьмой, восьмой, девятый, десятый и одиннадцатый разряды, то есть информация, учитывающая переносы формируется по правилу:

$$s_1 = 0;$$

$$s_{2=} = y_{1A} \wedge y_{1B};$$

$$s_3 = y_{2A} \wedge y_{2B} \vee (y_{2A} \vee y_{2B}) \wedge s_2;$$

$$s_4 = y_{3A} \wedge y_{3B} \vee (y_{3A} \vee y_{3B}) \wedge s_3;$$

$$s_5 = y_{4A} \wedge y_{4B} \vee (y_{4A} \vee y_{4B}) \wedge s_4;$$

.....

$$s_{12} = y_{11A} \wedge y_{11B} \vee (y_{11A} \vee y_{11B}) \wedge s_{11}.$$

Для рассматриваемого примера значения разрядов переносов имеют вид:

$$S_{\Pi} = 011\ 111\ 100\ 110.$$

*Свойство 6.* Формирование поправки  $\Pi_k$  к значению контрольных разрядов  $S_{k\ mod\ 2}$  осуществляется путем кодирования информации учитывающей переносы  $S_{\Pi}$  выбранным методом кодирования.

Для рассматриваемого примера кодирование значения

$$S_{\Pi} = 011\ 111\ 100\ 110$$

предлагаемым методом даст значение поправки  $\Pi_k = 110$ .

Поразрядное сложение по  $mod\ 2$  значения  $S_{k\ mod\ 2} = 100$  и значения поправки  $\Pi_k = 110$  даст правильное значение контрольных разрядов для полученной арифметической суммы:

$$S_k = 011\ 000\ 101\ 100\ 010.$$

### 4. Метод контроля АЛУ при выполнении логических операций

Рассмотрим контроль АЛУ на основе предлагаемого метода кодирования при выполнении следующих наиболее распространенных логических операций:

- а) сложение по  $mod\ 2$ ;
- б) операции сдвига;
- в) логического сложения;
- г) логического умножения.

#### 4.1. Контроль операции сложения по $mod\ 2$

Контроля операции сложения по  $mod\ 2$  рассмотрим на примере.

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Допустим, требуется сложить два кодовых набора, содержащих двенадцать информационных и три контрольных разряда:

$$A_K = 001\ 011\ 111\ 001\ 000 \text{ и}$$

$$B_K = 001\ 100\ 110\ 011\ 100.$$

Сложение кодовых наборов по  $mod2$  даст результат:

$$\begin{array}{r} 001\ 011\ 111\ 001\ 000 \\ \oplus 001\ 100\ 110\ 011\ 100 \\ \hline S = 011\ 000\ 101\ 100\ 100. \end{array}$$

*Свойство 7.* Результат сложения по  $mod2$  контрольных разрядов слагаемых соответствует результату сложения по  $mod2$  информационных разрядов рассматриваемых слагаемых.

Данное свойство позволяет контролировать операцию сложения по  $mod2$  и при этом обнаруживать и исправлять, возникающие ошибки по правилам предлагаемого метода кодирования.

### 4.2. Контроль операции сдвига

Рассмотрим основные положения способа контроля операции сдвига на примере кодового набора, содержащего 12 информационных разрядов:

$$A_K = 001\ 011\ 111\ 001\ 000.$$

Пусть требуется провести операцию сдвига информационных разрядов вправо на один разряд, в результате получим кодовый набор:

$$A_{KL} = 000\ 101\ 111\ 100\ 000$$

у которого значение контрольных разрядов не соответствует полученному результату (значение контрольных разрядов должно соответствовать 010).

В связи с этим возникает необходимость формирования поправки, позволяющей получить набор контрольных разрядов, соответствующий значению информационных разрядов, полученных при сдвиге вправо.

Для получения правильного значения контрольных разрядов сформируем поправку к имеющемуся значению контрольных разрядов.

Значение символов для формирования поправки при сдвиге вправо, формируются на основе исходного значения информационных разрядов следующим образом:  $s_{12} = z_1 \oplus y_{12}$  (где  $z_1$  - значение сигнала переноса из другого регистра, например в старший разряд регистра дополнительного из младшего разряда регистра сумматора при выполнении операции умножения)

$$s_{11} = y_{12} \oplus y_{11}; s_{10} = y_{11} \oplus y_{10}; s_9 = y_{10} \oplus y_9; s_8 = y_9 \oplus y_8;$$

$$s_7 = y_8 \oplus y_7; s_6 = y_7 \oplus y_6; s_5 = y_6 \oplus y_5; s_4 = y_5 \oplus y_4;$$

$$s_3 = y_4 \oplus y_3; s_2 = y_3 \oplus y_2; s_1 = y_2 \oplus y_1.$$

Для рассматриваемого примера при сдвиге вправо (при отсутствии переноса из другого регистра)

$$A_K = 001\ 011\ 111\ 001\ 000,$$

получим двоичный набор для формирования поправки  $P$  равный

$$S_P = 001\ 110\ 000\ 101.$$

При кодировании данного набора предлагаемым методом получим значение поправки  $P=010$ .

Сложение по  $mod2$  исходного значения контрольных разрядов с значением поправки даст правильное значение контрольных разрядов при сдвиге информационных разрядов вправо:

$$\begin{array}{r} A_{KL} = 000\ 101\ 111\ 100\ 000 \\ \oplus P = \phantom{000}\phantom{101}\phantom{111}\phantom{100}\ 010 \\ \hline S_P = 000\ 101\ 111\ 100\ 010. \end{array}$$

Значение символов для формирования поправки при сдвиге влево, формируются на основе исходного значения информационных разрядов следующим образом:  $s_{12} = z_1 \oplus y_{12}$  (где  $z_1$  - значение сигнала переноса старшего разряда одного регистра в младший разряд регистра сдвига)

$$s_2 = y_1 \oplus y_2; s_3 = y_2 \oplus y_3; s_4 = y_3 \oplus y_4; s_5 = y_4 \oplus y_5;$$

$$s_6 = y_5 \oplus y_6; s_7 = y_6 \oplus y_7; s_8 = y_7 \oplus y_8; s_9 = y_8 \oplus y_9;$$

$$s_{10} = y_9 \oplus y_{10}; s_{11} = y_{10} \oplus y_{11}; s_{12} = y_{11} \oplus y_{12}.$$

Пусть требуется провести операцию сдвига влево (при отсутствии переноса из другого регистра) на один разряд для двоичного набора

$$A_K = 001\ 011\ 111\ 001\ 000.$$

В результате получим кодовый набор

$$A_{KL} = 010\ 111\ 110\ 010\ 000$$

у которого значение контрольных разрядов не соответствует полученному результату (значению контрольных разрядов равно 110).

Информация для поправки имеет вид:

$$S_L = 011\ 100\ 001\ 010.$$

При кодировании данного набора предлагаемым методом получим значение поправки  $P=110$ .

Сложение по  $mod2$  исходного значения контрольных разрядов с значением поправки даст правильное значение контрольных разрядов при сдвиге информационных разрядов влево:

$$\begin{array}{r} A_{KL} = 010\ 111\ 110\ 010\ 000 \\ \oplus P = \phantom{010}\phantom{111}\phantom{110}\phantom{010}\ 110 \\ \hline S_{CL} = 010\ 111\ 110\ 010\ 110. \end{array}$$

*Свойство 8.* Сложение по  $mod2$  исходного значения контрольных разрядов с значением поправки при сдвиге вправо (влево) даст правильное значение контрольных разрядов при сдвиге информационных разрядов.

Данное свойство позволяет контролировать операцию сдвига и при этом обнаруживать и исправлять, возникающие ошибки по правилам предлагаемого метода кодирования.

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

### 4.3. Контроль выполнения логической операции ИЛИ

Рассмотрим основные положения способа контроля операции ИЛИ на примере.

Допустим, требуется выполнить логическую операцию ИЛИ относительно двух 12-разрядных кодовых слов:

$$\begin{aligned} A_k &= 001\ 001\ 111\ 001\ 110\ \text{и} \\ B_k &= 001\ 100\ 110\ 010\ 101. \end{aligned}$$

Логическое сложение информационных разрядов кодовых наборов и сложение по  $\text{mod}2$  контрольных разрядов даст результат:

$$\begin{array}{r} 001\ 001\ 111\ 001\ 110 \\ \vee\ 001\ 100\ 110\ 010\ \oplus\ 101 \\ \hline S_{\text{или}} = 001\ 101\ 111\ 100\ 011. \end{array}$$

В данном случае полученное значение контрольных разрядов 011 не соответствует требуемому значению контрольных разрядов 010.

В связи с этим, возникает необходимость формирования поправки к значению контрольных разрядов.

Для формирования поправки построим двоичный набор, используя логическую операцию И относительно информационных разрядов рассматриваемых чисел, в результате получим кодовый набор:

$$\begin{array}{r} 001\ 001\ 111\ 001 \\ \wedge\ 001\ 100\ 110\ 010 \\ \hline S_{\text{и}} = 001\ 000\ 110\ 000. \end{array}$$

Кодирование полученного двоичного набора выбранным методом кодирования даст значения поправки к контрольным разрядам при выполнении операции ИЛИ:  $P_{\text{или}} = 001$ .

Сложение по  $\text{mod}2$  полученного значения контрольных разрядов со значением поправки даст правильное значение контрольных разрядов для рассматриваемого примера:

$$\begin{array}{r} S_{\text{или}} = 001\ 101\ 111\ 011\ 011 \\ \oplus\ P_{\text{или}} = \phantom{001\ 101\ 111\ 011}\ 001 \\ \hline S_{\text{или п}} = 001\ 101\ 111\ 011\ 010. \end{array}$$

*Свойство 9.* Операция сложения по  $\text{mod}2$  полученных значений контрольных разрядов и значения поправки, сформированной на основе кодирования информации полученной при выполнении логической операции И относительно информационных разрядов, даст правильное значение контрольных разрядов.

### 4.4. Контроль выполнения логической операции И

Рассмотрим основные положения способа контроля операции И на примере. Допустим, требуется выполнить логическую операцию И

относительно двух 12-разрядных кодовых слов:

$$\begin{aligned} A_k &= 001\ 001\ 111\ 001\ 110\ \text{и} \\ B_k &= 001\ 100\ 110\ 010\ 101. \end{aligned}$$

Логическое умножение информационных разрядов кодовых наборов и сложение по  $\text{mod}2$  контрольных разрядов даст результат:

$$\begin{array}{r} 001\ 001\ 111\ 001\ 110 \\ \wedge\ 001\ 100\ 110\ 010\ \oplus\ 101 \\ \hline S_{\text{и}} = 001\ 000\ 110\ 000\ 011. \end{array}$$

В этом случае, значение контрольных разрядов не соответствует полученному результату (правильное значение контрольных разрядов имеет значение 001). В связи с этим, возникает необходимость формирования поправки, позволяющей получить набор контрольных разрядов, соответствующий значению информационных разрядов, полученных при выполнении операции логического сложения.

Для формирования поправки построим двоичный набор, используя операцию логическую ИЛИ относительно информационных разрядов рассматриваемых чисел, в результате получим кодовый набор:

$$001\ 101\ 111\ 011.$$

Кодирование полученного двоичного набора выбранным методом кодирования даст значения поправки к контрольным разрядам при выполнении операции И:  $P_{\text{и}} = 010$ .

Сложение по  $\text{mod}2$  полученного значения контрольных разрядов с значением поправки даст правильное значение контрольных разрядов для рассматриваемой операции:

$$\begin{array}{r} S_{\text{и}} = 001\ 000\ 110\ 000\ 011 \\ \oplus\ P_{\text{и}} = \phantom{001\ 000\ 110\ 000}\ 010 \\ \hline S_{\text{и п}} = 001\ 000\ 110\ 000\ 001. \end{array}$$

*Свойство 10.* Операция сложения по  $\text{mod}2$  полученных значений контрольных разрядов и значения поправки, сформированной на основе кодирования информации полученной при выполнении логической операции ИЛИ относительно информационных разрядов, даст правильное значение контрольных разрядов.

## 5. Заключение

Современные СУ в значительной степени характеризуются достоверностью функционирования ЭВМ (достоверностью функционирования арифметико-логических устройств процессоров при выполнении арифметических и логических операций).

Существующие методы повышения достоверности АЛУ ЭВМ требуют для этих целей больших аппаратных и временных затрат, что снижает их эффективность.

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Установлено, что разрешение данного противоречия возможно на основе использования алгебраического линейного кода, обнаруживающего ошибки заданной кратности при минимальных временных и аппаратных затратах, и адаптации данного метода кодирования для обнаружения ошибок АЛУ процессора при выполнении арифметических и логических операций.

В результате исследований выявлены закономерности, определяющие соотношения между арифметико-логическими операциями и значениями контрольных разрядов линейного кода относительно данных операций, позволяющие сформулировать правила получения значений поправок к контрольным разрядам кода для обнаружения одиночных и двойных ошибок при минимальной информационной избыточности, аппаратных и временных затратах.

Предлагаемый методический подход обнаружения ошибок позволяет обеспечить повышение достоверности функционирования АЛУ процессора за счет обнаружения одиночных и двойных ошибок при использовании минимальной информационной избыточности, сокращении аппаратных затрат и без снижения быстродействия контролируемого устройства.

### Литература

1. Клаассен К.Б.: Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике. М.: Постмаркет, 2000.
2. Корсунский Д.А., Рыженков В.А. Обнаружение ошибок в запоминающих устройствах хранения и передачи информации с минимальными аппаратными затратами // Известия Института инженерной физики, 2017. №2(44). С.34-40.
3. Раннёв Г. Г., Тарасенко А. П. Методы и средства измерений. М.: Академия, 2004.
4. Муха Ю.А., Королева И.Ю. Информационно-измерительные системы. Волгоград: Волг. ГТУ, 2015.

5. Островерхов Е.В. Микропроцессор с интегрированным модулем для автоматизации измерений электрических величин [электронный ресурс]: <http://storage.tusur.ru/files/8849/ЭП>.

6. Павлов А.А., Неустроев С.С., Роберт И.В., Рягин С.Н., Царьков А.Н., Сорокин Д.Е., Бурмистров А.А., Иванов Д.Д. Обнаружение ошибок устройств хранения и передачи информации // Известия Института инженерной физики. 2016. №1(№39). С. 59-66.

7. Щербаков Н. С. Достоверность работы цифровых устройств. М.: Машиностроение, 1989.

8. Hagbae Kim, Kang G. Shin. Evaluation of Fault Tolerance Latency from Real-Time Application's Perspectives // IEEE Transactions on computers, January 2000. V. 49. No 1. P. 55-64.

9. Борисов К.Ю., Павлов А.А., Павлов П.А., Царьков А.Н., Хоруженко О.В. Рациональное кодирование информации для обнаружения ошибок в устройствах хранения и передачи информации измерительной техники // Измерительная техника, 2011. №12. С. 22-25.

10. Naseer R., Draper J. Parallel Double Error Correcting Code Design to Mitigate Multi-Bit Upsets in SRAMs // Information Sciences Institute University of Southern California, IEEE Trans Device. Mater 2008. V. 6. P. 222-225.

11. Павлов А.А., Павлов П.А., Царьков А.Н., Хоруженко О.В. Функционально-кодовый контроль ошибок в автоматизированных системах измерительной техники // Измерительная техника, 2009. № 9. С. 3-5.

12. Павлов А.А., Царьков А.Н., Хоруженко О.В., Павлов П.А. Метод контроля ошибок в устройствах хранения и передачи информации автоматизированных систем измерительной техники // Измерительная техника, 2010. № 11. С. 21-25.

13. Павлов А.А., Царьков А.Н., Павлов П.А., Корсунский Д.А, Волков В.З. Обнаружение ошибок в запоминающих устройствах информационно-измерительных систем // Измерительная техника, 2017, №10. С. 12-16.

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.89

**МОДЕЛЬ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ  
ДИАЛОГОВОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ  
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО  
ЗАКАЗА БИЛЕТОВ НА ОСНОВЕ  
СЕМАНТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА**

**THE MODEL OF INTELLECTUAL  
DIALOGUE SYSTEM FOR AUTOMATED  
TICKET RESERVATION BASED ON  
SEMANTIC ANALYSIS**

**Юрий Михайлович Монахов**

*кандидат технических наук  
доцент*

Владимирский государственный университет  
имени А.Г. и Н.Г. Столетовых  
Адрес: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87  
Тел.: +7(904)596-91-14  
E-mail: unklefck@gmail.com

**Евгений Олегович Маков**

*студент*

Владимирский государственный университет  
имени А.Г. и Н.Г. Столетовых  
Адрес: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87  
Тел.: +7(906)611-31-92  
E-mail: Evgeniumakov97@gmail.com

**Лариса Андреевна Артюшина**

*кандидат педагогических наук  
доцент*

Владимирский государственный университет  
имени А.Г. и Н.Г. Столетовых  
Адрес: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87  
Тел.: +7(4922) 479-746  
E-mail: larisa-artusina@yandex.ru

**Мария Рустамовна Исмаилова**

*студент*

инженер кафедры информатики  
и защиты информации  
Владимирский государственный университет  
имени А.Г. и Н.Г. Столетовых  
Адрес: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87  
Тел.: +7(920)925-23-03  
E-mail: maryfelin@gmail.com

## Аннотация

В статье представлена разработка модели интеллектуальной диалоговой системы (ИДС) на основе семантической обработки информации. Изложен алгоритм работы автоматической системы бронирования билетов по средствам ведения диалога. Представлены результаты анализа разработки компонентов системы и спроектирована модель ИДС.

**Ключевые слова:** семантический анализ, интеллектуальная диалоговая система, обработка естественного языка, семантические сети, семантическая обработка информации, мессенджер.

## Summary

In this article is presented development of model of intellectual dialogue system (IDS) on the basis of semantic information processing. The algorithm of work of an automatic booking system of tickets on means of conducting dialogue is stated. Results of the analysis of development of components of system are presented and the IDS model is designed.

**Keywords:** semantic analysis, intellectual dialogue system, natural language processing, semantic networks, semantic information processing, messenger.

## 1. Введение

В настоящее время растет количество сетевых ресурсов и услуг. Для получения необходимой информации пользователю требуется использовать несколько сервисов для получения конкретного ответа на поставленную задачу. Разнообразие вариантов взаимодействия приводит к увеличению времени на обучение работы с системой, и, как следствие, затрудняет свобод-

ное использование этой системой. В связи с этим существует и продолжает расширяться спектр интеллектуальных диалоговых систем, которые предоставляют человеку возможность на естественном языке в свободной форме обращаться в автоматическом режиме к данным, предоставляемым несколькими сервисами одновременно. Одним из важных методов для создания таких систем является выделение знаний из данных,

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

предоставляемых пользователем на обработку.

Исходя из вышесказанного, цель работы определена как разработка модели ИДС для автоматизированного заказа билетов на основе семантического анализа.

В соответствии с целью мы выделили объект и предмет исследования. Объектом данного исследования является сервис предоставления услуг, а предметом исследования – методы анализа на основе моделей семантической обработки информации.

При разработке интеллектуальных диалоговых систем предполагается, что процесс ведения диалога обеспечивает удовлетворение информационных потребностей конечных пользователей.

Следует обратить внимание на тот факт, что интеллектуальные диалоговые системы должны быть способны поддерживать связанный диалог, а значит, настраиваться на изменчивость информационных процессов и адаптироваться к их изменению, учитывая их точку зрения [6].

Определение структуры ведения диалога является одной из обязательных функций ИДС. Является необходимым понимать и преобразовывать поступающие от пользователя высказывания на ограниченном естественном языке в выражения на языке внутреннего представления. Где ограниченный естественный язык – это подмножество естественного языка, текст на котором успешно воспринимается носителем полного естественного языка без приложения дополнительных усилий.

Поиск знаний, в отличие от простого поиска информации, требует учета семантики запросов. Для естественного-языкового пользовательского интерфейса вопросно-ответных систем можно также использовать ограниченную лексику и грамматику языка [2]. При этом не происходит серьезного ухудшения функциональности и производительности вопросно-ответной системы.

В работе под определением знания мы будем рассматривать закономерности предметной области (принципы, связи, законы), полученные в результате практической деятельности и профессионального опыта, позволяющие специалистам ставить и решать задачи в данной области.

Процесс генерации, который также является одной из важнейших функций системы, формирует запрос выходных высказываний на естественном языке. Современный период развития ИДС характеризуется использованием методов и естественного-языковых систем в сети Интернет.

Не требуется дополнительного изучения ограниченной версии языка для составления текстов. Данный язык обладает сокращенным

набором лексики и грамматики. Это позволяет сократить время анализа естественно-языковых элементов в вопросно-ответной системе, а также помогает избежать неоднозначностей на лингвистическом уровне.

### 2. Существующие методы

В последние годы ведется много исследований в области построения архитектуры ИДС. Модели представлены нейросетевой архитектурой, методами NLP-обработки и машинного обучения [5].

В процессе построения семантической модели слова учитывается его многозначность. Смысл слова рассматривается как некоторое множество различных значений. Каждое из этих значений или вся совокупность в целом реализуется в определенном контексте. Результатом семантического анализа является конструкция запроса к информационной системе.

Цикл работы естественно-языкового интерфейса начинается с ввода пользователем сообщения на естественном языке путем ввода текста. По введенному в систему тексту строится его формальное описание. Все предшествующие результаты анализа используются при анализе последующих запросов, что позволяет системе сохранять ход диалога с пользователем и разрешать спорные моменты, связанные с использованием одних и тех же терминов в разных предметных областях.

Диалоговая система состоит из пяти компонентов [4]:

- Преобразования входных данных.
- Понимание естественного языка.
- Диспетчер диалогов.
- Генератор ответов.
- Вывод данных пользователю.

Далее рассмотрим каждый из приведенных выше компонентов системы более подробно [1, 3].

Первым этапом обработки запроса системой является распознавание семантической составляющей для преобразования данных в текст. Этот компонент присутствует только в диалоговых системах, взаимодействующих с речью клиента, включает в себя распознавание речи. Это требует знание фонетики и фонологии. Фонетика – это отрасль лингвистики, которая занимается звук речи и их производство, сочетание, описание и презентация в письменных символах. Фонология – это изучение речевого звука на языке или языка со ссылкой на их пространство и шаблон и негласные правила, определяющие произношение. В дополнение к речевым диалоговым системам входные данные могут быть представлены как жест, почерк и т.д.

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Преобразованные данные далее поступают в компонент обработки данных на естественном языке, где он преобразует последовательность слов в семантическое представление, которое может использоваться менеджером диалога. Выделение именованных сущностей из обрабатываемого запроса основано на работе с недетерминированными и неоднозначными контекстно-свободными грамматиками.

Далее выделенные факты поступают в диспетчер диалога, который управляет всеми аспектами диалога. Он принимает семантическое представление текста пользователя, определяет, как текст вписывается в общий контекст и создает семантическое представление ответа системы. Диспетчер диалога выполняет следующие задачи:

- Поддержка сессий диалогов.
- Принятие направления диалога.
- Взаимодействие с содержимым, хранящимся в файловых хранилищах или базе данных.
- Обработка проблемы прагматики.

Для этих задач у менеджера диалогов существуют следующие модули:

- Диалоговая модель.
- Пользовательская модель.
- База знаний.
- Дискуссионный менеджер.

Диспетчер диалога обычно должен взаимодействовать с каким-то внешним программным обеспечением, таким как база данных или экспертная система. Таким образом, запрос или планы должны быть преобразованы из внутреннего представления, используемого диспетчером диалога, в формат, используемый системой, специфичной для внешнего сервиса.

Далее управление по обработке запроса передается в генератор ответов. Данный компонент включает в себя построение сообщения, которое должно быть задано пользователем. Он принимает решение о том, какую информацию следует включать, как структурировать информацию, выбирать слова и синтаксическую структуру для сообщения. В современных системах используются простые методы, такие как вставка извлеченных данных в шаблон.

### 3. Разработка модели

В нашем подходе для проектирования ИДС была взята за основу пятикомпонентная модель. На основе того, что разрабатываемая диалоговая система принимает на вход текстовые сообщения от пользователя, первый этап обработки сообщения был опущен в ходе проектирования. Архитектура ИДС примет следующий вид (рис. 1).

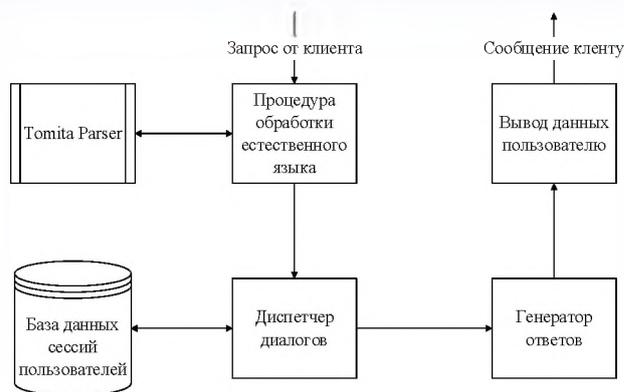


Рис. 1. Архитектура ИДС

Компонент обработки текста на естественном языке выполнен на основе Томита парсера (GLR-parser). Данный выбор был обоснован следующими факторами: недетерминированность и неоднозначность языка запросов пользователя. Для заполнения карточки сессии диалога клиента, были разработаны уникальные грамматики для выделения следующих видов сущностей:

- название населенного пункта и направление;
- дата;
- относительные временные показатели (время года, начало/середина/конец года/месяца/недели);
- логическое значение перемещение пользователя (в одну сторону/обратно).

Структура карточки сессии, на основе которой формируется конечный запрос к сервису, имеет следующий вид:

- город вылета клиента;
- город прибытия;
- дата вылета (формат день-месяц-год);
- дата возвращения (формат день-месяц-год);
- логическое поле факта возвращения.

Поиск фактов происходит при помощи контекстно-свободных грамматик и словарей ключевых слов (газетиров) (рис. 2).

```

St1 -> Sity interp (Sparrow.S1);
St2 -> Sity interp (Sparrow.S2);
St2_prep -> "в" Sity interp (Sparrow.S2);
St2_prep -> "до" Sity interp (Sparrow.S2);
St2_prep -> "на" Sity interp (Sparrow.S2);
St2_prep -> "по" Sity interp (Sparrow.S2);
Sub -> St1;
Sub -> St2;
Sub -> St2_prep;
Sub -> St1 MyAnyWord* St2;
Sub -> St2_prep MyAnyWord* St1;

//Набор результирующих грамматик
S -> Sub;
S -> Sub Date;
S -> Sub MyAnyWord* Date MyAnyWord* RevDate;
S -> St1 MyAnyWord* Date MyAnyWord* St2;
S -> Date MyAnyWord* Sub MyAnyWord* RevDate;
S -> Date MyAnyWord* Sub;
S -> Sub MyAnyWord* Date;
S -> Sub MyAnyWord* RevDate;
S -> RevDate MyAnyWord* Sub;
  
```

Рис. 2. Пример грамматик для обработки запросов

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

```
CREATE TABLE voicecom.session (
  id          INTEGER NOT NULL PRIMARY KEY,
  city_depart TEXT,
  city_return TEXT,
  DepartDate  DATE,
  DepartTime  TIME,
  ReturnDate  DATE,
  ReturnTime  TIME,
  Return      BOOLEAN
);

CREATE TABLE voicecom.countries (
  id          INTEGER NOT NULL PRIMARY KEY,
  currency    TEXT,
  name_translations_ru TEXT,
  code        TEXT
);

CREATE TABLE voicecom.planes (
  id          INTEGER NOT NULL PRIMARY KEY,
  code        INTEGER,
  name        TEXT
);
```

Рис. 3. Схема БД сессии, страна, типы авиатранспорта

```
CREATE TABLE voicecom.airports (
  id          INTEGER NOT NULL PRIMARY KEY,
  name        TEXT,
  time_zone   TEXT,
  name_translations_ru TEXT,
  country_code TEXT,
  city_code   TEXT,
  code        TEXT,
  flight_table BOOLEAN,
  coordinates_lon FLOAT,
  coordinates_lat FLOAT
);

CREATE TABLE voicecom.airlines (
  id          INTEGER NOT NULL PRIMARY KEY,
  name        TEXT,
  alias       TEXT,
  iata        TEXT,
  icao         TEXT,
  callsign    TEXT,
  country     TEXT,
  is_active   BOOLEAN
);
```

Рис. 4. Схема БД аэропорты, авиалинии

База слов для поиска и идентификации в словосочетаниях и морфологических формах образуют семантическое ядро, используемое для оптимизации задачи извлечения фактов.

Далее извлеченные факты передаются в компонент диспетчер диалогов. Там они идентифицируют пользователя, происходит поиск на существующий незаконченный диалог с ним. Если такой диалог найден, из базы данных происходит загрузка предыдущей сессии для дополнения новыми фактами. Если данных о предыдущей незаконченной сессии не было получено, тогда выделенные факты передаются далее по конвейеру.

Рассмотрим структуры базы данных, используемой для хранения сессий и данных о городах, маршрутах и аэропортах для системы ICAO. За основу была взята СУБД PostgreSQL. Были разработаны и нормализованы следующие представления для хранения данных: сессия, страна,

город, тип авиатранспорта, аэропорт, авиалиния. Ниже представлены поля используемые для каждого объекта (рисунки 3, 4).

Генератор ответов, основан на вопросно-ответной форме ведения диалога, использует регулярные правила для создания ответов на запросы от пользователя. Ниже приведена схема (рисунок 5) работы системы принятия решений на основе автоматной модели в зависимости от набора обрабатываемых полей.

Если факты покрывают используемые поля запроса к интерфейсу сервиса авиаперелетов Flightstats, тогда система отправляет запрос на поиск билетов по известным характеристикам. На основе полученных данных сервиса генерируется сообщение клиенту с использованием шаблонов ответов.

Сообщения из вышеизложенного компонента попадают в распределенный модуль вывода данных пользователю, который контролирует

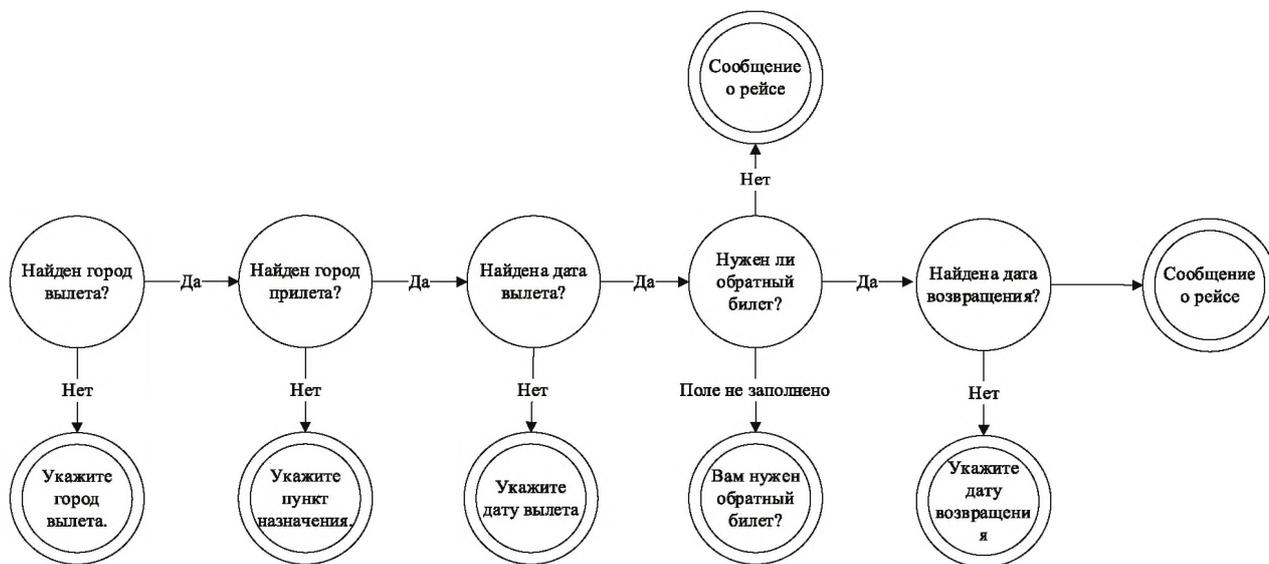


Рис. 5. Автомат генератора ответа ИДС

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

очереди сообщений и нагрузку на взаимодействие с сервисом, предоставляющим функции мессенджера. Для работы данной системы использовалось открытое API Telegram Bot. На рисунке 6 представлена реализованная модель диалога пользователя с системой:

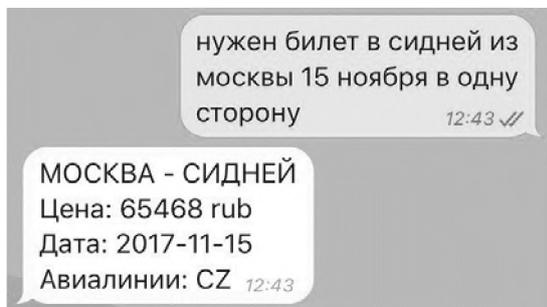


Рис. 6. Модель общения системы с пользователем

### 4. Вывод

Практическая значимость исследования заключается, прежде всего, в создании интеллектуальной диалоговой системы для взаимодействия пользователя на естественном языке с сервисами, предоставляющими услуги бронирования и заказа авиабилетов. Это позволит сократить время для анализа и обработки полученной информации от сервиса. От клиента также не

требуется адаптация и обучение с программным обеспечением. И таким образом, задача заказа билета пользователем сводится к диалогу с минимальным количеством уточняющих вопросов без использования графического интерфейса, что будет повышать скорость работы с сервисом.

### Литература

1. Зубкова А.Н. Авточаты с искусственным интеллектом: оптимизация онлайн-поддержки клиентов, 2014.

2. Огарок А.А. Теория семантической обработки информации // Информатизация и связь, 2013. №. 3. С. 67-70.

3. Проватар А.И., Клочко К.А. Особенности и проблемы виртуального общения с помощью чат-ботов // Научные труды Винницкого национального технического университета, 2013. №. 3.

4. Рыбина Г.В. Основы построения интеллектуальных систем. М.: Финансы и статистика, 2010.

5. Сигов А.С., Нечаев В.В., Кошкарёв М.И. Архитектура предметно-ориентированной базы знаний интеллектуальной системы // International Journal of Open Information Technologies, 2014. Т. 2. №. 12.

6. Ясницкий Л.Н. Введение в искусственный интеллект. Академия, 2008.



# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК: 004.932.2

## О ПРОГРАММНОЙ СИСТЕМЕ СКРЫТОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В ИЗОБРАЖЕНИЯХ ФОРМАТА JPEG-2000

## ABOUT THE SOFTWARE SYSTEM OF HIDDEN DATA TRANSMISSION IN JPEG-2000

**Вадим Геннадьевич Грибунин**  
*почетный работник науки и техники РФ*  
доктор технических наук  
главный научный сотрудник  
МОУ «ИИФ»  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: 8(4967)35-31-93  
E-mail: v.gribunin@iifmail.ru

**Алексей Михайлович Рязанцев**  
кандидат технических наук  
начальник отдела  
МОУ «ИИФ»  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: 8(4967)35-31-93  
E-mail: spmo@iifmail.ru

**Михаил Кристофорович Ридли**  
аспирант  
Московский авиационный  
институт (Национальный  
исследовательский университет)  
Адрес: 125993, г. Москва,  
Волоколамское шоссе, д. 4  
Тел.: 8(499)158-92-09  
E-mail: mr@kalabi.ru

**Дмитрий Вячеславович Смирнов**  
*почетный работник науки и техники РФ*  
доктор технических наук, доцент  
действительный член АИИ  
Генеральный директор –  
Первый Вице-президент Института  
МОУ «ИИФ»  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7 (4967) 35-31-93

### Аннотация

В данной статье рассмотрены области применения стандарта изображения JPEG-2000. А также приведена структурная схема программной системы скрытой передачи данных с подробным описанием принципов построения кодера и декодера системы скрытия.

**Ключевые слова:** скрытая передача данных, система скрытия, вейвлет-преобразование.

### Summary

In this article, we consider the areas of application of the JPEG-2000 image standard. And also the structural scheme of the program system of the latent data transmission with the detailed description of principles of construction of the encoder and the decoder of the system of concealment is given.

**Keywords:** hidden data transmission, hiding system, wavelet transform.

### О типичных изображениях для различных сред передачи

Для определения параметров системы скрытой передачи данных на основе JPEG-2000 необходимо изучить области применения данного стандарта, характерные для каждой области изображения-контейнеры и параметры алгоритма. Это является тем более сложной задачей, что в настоящее время известно очень ограниченные случаи коммерческого применения стандарта. Рассмотрим существующие и перспективные области применения и характерные для них изо-

бражения, а также коэффициенты сжатия.

В силу популярности действующего стандарта JPEG для практического применения стандарта JPEG-2000 недостаточно того, что он «лучше сжимает». В первую очередь новый стандарт будет применяться там, где невозможно применение стандарта JPEG.

1. Изображения с размерами больше, чем 64Кх64К. Такие изображения могут применяться при воздушной фотосъемке, в астрономии, медицине и т.д. Вряд ли можно ожидать их широкого распространения на бытовом уровне.

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Поэтому рассматривать их в качестве потенциальных контейнеров для системы скрытой передачи данных не следует.

2. Приложения, сильно ограниченные по доступному объему памяти и полосе пропускания и, поэтому, требующие сильного сжатия. Здесь в первую очередь надо отметить мобильные приложения: телефоны, коммуникаторы, ноутбуки с GPRS и т.д. На наш взгляд, можно ожидать широкого применения JPEG-2000 в мобильных приложениях. Вычислительные возможности мобильных процессоров растут, а стоимость радиоканалов – практически не уменьшается. Поэтому здесь существует потребность в сильном сжатии. Кроме того, алгоритм JPEG-2000 намного более помехоустойчив, чем JPEG, так что в условиях плохих каналов будет заметен выигрыш. Характерные размеры передаваемых изображений составляют до 1920x1280 и более с 32 битами на пиксел (ноутбуки). Степень сжатия зависит от приложения и может составлять до 100 и более раз.

3. Интернет. На наш взгляд, перспективы популярности JPEG-2000 в Интернете зависят в основном от того, сможет ли он победить в борьбе за мобильный сегмент рынка. Потому что в настоящее время не существует острой потребности во внедрении этого стандарта в традиционные сети. Наиболее популярными алгоритмами сжатия файлов, наряду с JPEG, в настоящее время являются алгоритмы, реализованные в форматах GIF, PNM. Для сжатия текстово-графической информации используется алгоритм DjVu.

Для Интернета характерно наличие как высококачественных изображений с коэффициентом сжатия 10-20 раз, так и низкокачественных (коэффициент сжатия 100 раз и более). Размеры могут также меняться в самых разных пределах. Применяются в основном полноцветные изображения (24 и 32 бит/пиксел).

Итак, можно сделать вывод о том, что система скрытой передачи данных со специальным доступом должна быть ориентирована на использование изображений достаточно большого объема (1920x1280 и более) с глубиной кодирования цвета 24 или 32 бит/пиксел, которые подверглись достаточно сильному сжатию (20-100 раз). Ее, очевидно, будет невозможно применять при передаче контейнеров по некачественным каналам связи, в которых нет гарантии качества обслуживания.

### **Структурная схема программной системы скрытой передачи данных**

Алгоритм сжатия JPEG-2000 состоит из трех основных процедур: вейвлет-преобразования,

квантования и энтропийного кодирования. Соответственно существуют возможности осуществления скрытия на всех этапах.

Внедрение в пространственную область изображения, также, как и после выполнения его вейвлет-преобразования, приведет к проблеме помехозащиты передаваемой информации от помех квантования. Это приведет к неоправданной избыточности и малой пропускной способности системы специального доступа.

Известны предложения по скрытию информации за счет манипуляций параметрами энтропийного кодера. Однако представляется, что объем передаваемой таким образом информации невелик. Кроме того, метод либо небезопасен, либо сводится к внедрению в квантованные коэффициенты. В самом деле, если после декодирования нарушитель получит немодифицированные коэффициенты, то он, зная истинный алгоритм кодирования, получит затем другой сжатый поток и выявит факт вмешательства. Если же после декодирования он получит модифицированные коэффициенты, то это эквивалентно тому, что внедрение выполнялось в квантованные коэффициенты. С той только разницей, что в последнем случае мы имеем возможность контролировать безопасность внедрения, а в случае использования энтропийного кодера – нет.

Таким образом, наиболее подходящим является осуществление скрытия за счет модификации квантованных коэффициентов вейвлет-преобразования. При этом следует учесть особенности квантования в данном стандарте. Оно производится в три этапа: этап определения знака, этап определения значимости коэффициентов и этап уточнения их амплитуды. Первые два этапа, очевидно, не подходят для скрытия информации, так как при этом будут внесены слишком большие искажения. Внедрение возможно на третьем этапе или, что представляется эквивалентным и даже более удобным, после завершения работы квантователя.

При этом внедрение будет осуществляться по существу не в сами коэффициенты, а в индексы квантователя. Вклад энергии каждого бита индекса в общую сумму будет зависеть не только от номера битовой плоскости, но и от субполосы и от блока, которым он принадлежит. Дело в том, что изменение каждого бита будет приводить к изменению номера интервала, к которому принадлежит коэффициент. Изменение младшего значащего бита приведет к смещению коэффициента в соседний интервал квантования, бита второй плоскости – через один интервал и т.д. Так как для разных субполос назначается разный шаг квантования, то изменение битов

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

одной и той же битовой плоскости разных субполос будет обуславливать различную энергию шума. В стандарте жестко не предписывается размер шага квантования для различных субполос, но рекомендуется выбирать его следующим образом. Если шаг квантователя  $n$ -й субполосы вейвлет-преобразования равен  $\Delta$ , то шаг квантователя  $n+1$ -й субполосы будет равен  $2\Delta$ . Например, если выбрать шаг квантования самой низкочастотной субполосы равным 1, то шаг квантования субполосы пятого уровня разложения будет равен 16. Изменение младшего значащего бита в этой субполосе приведет к изменению квантованного коэффициента на 16. Отметим правда, что значимых коэффициентов (не равных нулю после квантования) в высокочастотных субполосах крайне мало, как будет показано далее при изучении статистики субполос. Поэтому их можно не использовать.

Определенную сложность для скрытия сообщений представляет то, что кодирование отдельных блоков ведется независимо. Значит, также должно осуществляться и внедрение. Возникает вопрос: как распределить передаваемое сообщение по отдельным блокам. В решении этой задачи помогает квантователь: перед началом квантования он определяет, сколько бит отвести на ту или иную субполосу и блок. Эта задача выполняется кодером путем решения задачи поверхностно-выпуклой оптимизации, и ее результаты могут быть использованы системой скрытия для распределения сообщения по блокам. Доля передаваемого сообщения блоком прямо пропорциональна доле выделенного для ее кодирования числа бит.

Понятно, что для скрытия данных должны использоваться ненулевые коэффициенты преобразования или коэффициенты, превышающие некоторый порог. Ясно также, что использоваться должны не все коэффициенты, а какая-то их часть. Кодер должен каким-то образом передать декодеру, какие коэффициенты он использовал, а также порядок помещения передаваемого сообщения в контейнер, если оно не размещалось последовательно. Для этих целей лучше всего подходит использование программного датчика псевдослучайных чисел (ПДСЧ), начальное заполнение которого известно декодеру и используется в качестве секретной составляющей корреспондентов. Естественно, что эта составляющая может быть сеансовой для избежания перекрытия. Существуют атаки, основанные на известности нарушителю нескольких защищенных изображений на одной и той же секретной составляющей.

ПДСЧ имеет и другое назначение. Для до-

стижения незаметности передаваемое сообщение должно иметь те же статистические свойства, что и естественно присутствующий в изображении шум. Поэтому может возникнуть необходимость в модуляции информационных данных последовательностью, имеющей нужное распределение.

Таким образом, получаем следующую передающую часть системы скрытия, основанной на использовании методов сжатия статических изображений в формате JPEG-2000 (рисунк 1).



Рис. 1. Передающая часть системы скрытия

Центральное место в этой части занимает кодер. Его задача осуществить модуляцию информационного сообщения и разместить его среди битов квантованных коэффициентов волнового преобразования. Обе задачи он должен выполнять адаптивно по отношению к контейнеру. Здесь проблема заключается в том, что механизм адаптации должен быть повторен декодером, который располагает несколько иным, искаженным контейнером. Поэтому адаптация должна быть достаточно «робастной» к небольшим изменениям контейнера.

Приемная часть системы скрытия изображена на рисунке 2. Как видно из рисунка 2, в общем случае имеется два получателя информации: адресат, получающий контейнер и собственно адресат нашей системы, получающий информационное сообщение. В качестве первого адресата может выступать и нарушитель.

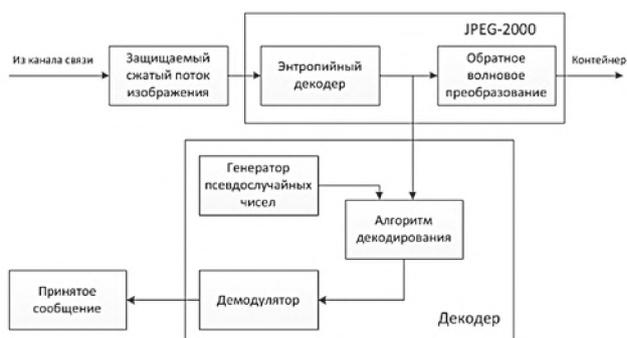


Рис. 2. Приемная часть системы скрытия

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Зачастую может возникнуть необходимость передачи декодеру дополнительной информации. В качестве такой информации может выступать начальное заполнение ПДСЧ, характеристика используемого распределения (в случае оценки такового кодером), математическое ожидание, дисперсия. Дополнительная информация может быть либо передана по отдельному каналу связи, либо одновременно с информационным сообщением, что уменьшит пропускную способность канала связи. Кроме того, если передавать одновременно с информационным сообщением, то для этого придется использовать некоторые заранее оговоренные позиции в коэффициентах, остающиеся неизменными от раза к разу, что может снизить безопасность.

Таким образом, существует три варианта построения системы скрытия:

- без передачи дополнительной информации декодеру;
- передача дополнительной информации по отдельному каналу связи;
- передача дополнительной информации вместе с информационным сообщением.

У каждого из вариантов есть достоинства и недостатки. Конечно, если существует такая возможность, второй вариант предпочтительнее. В противном случае придется использовать третий вариант построения системы.

Организация скрытия в алгоритме кодирования возможна в общем случае двумя способами: путем добавления к коэффициентам некоторой псевдошумовой последовательности или путем переквантования этих коэффициентов.

Как уже отмечалось при доступе в квантованные коэффициенты мы имеем дело не с самими коэффициентами, а с их индексами. Добавление шума к индексам эквивалентно переквантованию коэффициентов. Так что известная классификация методов в данном случае не имеет смысла.

Общим требованием к специальному алгоритму является нелинейность специальной функции и незаметность доступа в статистическом смысле. Для большей безопасности целесообразно для передачи одного бита информации использовать более одного коэффициента вейвлет-преобразования изображения. Этому требованию удовлетворяет алгоритм построения кодера, рассмотренный далее.

### Принципы построения кодера и декодера системы скрытия

Из анализа противоборства скрытию данных следует, что внедрение в младший бит сообщений является небезопасным. Это связано с тем,

что вносимые при этом искажения не могли бы возникнуть в реальном изображении, что может быть выявлено статистическими методами. Лучший результат дает используемый в алгоритме Hide метод прибавления/вычитания единицы, что значительно затрудняет задачу анализа. В этом случае вероятности символов определяются следующим образом:

$$P(-1) = p/2, P(+1) = p/2, P(0) = 1 - p, \quad (1)$$

причем модифицируется  $100 \cdot p\%$  пикселей.

Однако при этом возникает следующая проблема: появляется слишком много близких друг к другу цветов (отличающихся друг от друга на 1 в каждой компоненте цвета). Это позволяет провести успешную атаку на алгоритм Hide для некоторых типов контейнеров (для изображений, имеющих малое число цветов).

Причина небезопасности внедрения заключается в том, что при защите не учитываются свойства контейнера. Для вейвлет-коэффициентов изображения можно выделить следующие характеристики:

- статистические взаимосвязи между вейвлет-коэффициентами;
- характеристики шума, присутствующего в изображении.

Если удельный объем передаваемых данных не очень велик, то статистические взаимосвязи между вейвлет-коэффициентами нарушены не будут. Тем не менее, кодер должен проверять то, что они не разрушены в результате внедрения.

Шум в изображении может появиться от нескольких источников. Его модель будет изменяться в зависимости от типа используемого сканера, ПЗС-матрицы фотоаппарата и т.д. Кроме того, шум изначально присутствует в высококачественных изображениях. Оба типа шума обычно моделируются как гауссовский процесс с нулевым средним. В результате вейвлет-преобразования характер шума не изменяется. Однако после квантования коэффициентов он может быть удален. Наличие «остаточного» шума зависит от степени сжатия, то есть грубости применяемого квантования. При сильном сжатии по стандарту JPEG-2000 наблюдается эффект сглаживания, размытия изображения. Ясно, что распределение шума носит уже негауссовский характер и добавление передаваемой информации в виде гауссовского шума будет небезопасно.

Далее предлагается алгоритм скрытия, основанный на адаптивной модификации индексов квантованных коэффициентов после анализа их статистики. Анализ статистики выполняется для каждой субполосы вейвлет-преобразования и для каждой из используемых битовых пло-

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

скостей. При этом считается, что не существует возможности передачи декодеру как статистических параметров, так и номеров использованных индексов. Поэтому адаптация заключается в модификации одного из четырех индексов коэффициентов. Индексы известны декодеру, так как они находятся в соответствии с последовательностью, генерируемой ПДСЧ.

Алгоритм основан на передаче информационного бита модификацией четверки битов индексов. При этом значению бита ставится в соответствие четность/нечетность четверки. Биты в четверку набираются следующим образом: два бита из младшей битовой плоскости, 1 бит из второй «снизу» и один бит из третьей «снизу» – все из разных индексов коэффициентов в пределах данной субполосы. Индексы, как возможно и используемая битовая плоскость, генерируются ПДСЧ, начальное заполнение которого известно декодеру. Ясно, что в среднем в половине случаев модификация не требуется, так как нужная четность четверки уже имеется. В оставшейся половине случаев мы можем изменять либо один, либо три бита четверки, в зависимости от требуемой статистики. Конечно, чаще всего будет производиться изменение младших битов для уменьшения вносимого искажения. Однако, если статистика «неблагоприятна», то мы можем изменять и другие биты в пределах четверки.

Декодеру нет нужды знать о том, какие именно индексы были модифицированы. Он просто вычисляет четность четверки бит, взятых в соответствии с числами на выходе ПДСЧ, идентичному и синхронному используемому в кодере.

Основная трудность в данном алгоритме состоит в том, какие индексы использовать. Ясно, с одной стороны, что это должны быть ненулевые индексы. Но тогда существует возможность того, что индексы со значениями 1, 2, 4 могут принять нулевое значение под воздействием предлагаемого алгоритма (единственный имеющийся у них значащий бит будет заменен нулем). В этом случае декодер не будет способен правильно определить используемые индексы, так как множество ненулевых индексов, которым располагают кодер и декодер будут разными. Следовательно, необходимо запретить переходы  $1 \rightarrow 0, 2 \rightarrow 0, 4 \rightarrow 0$ . Необходимость подобного перехода возникнет только в половине из случаев, когда в очередной выбранной четверке встретится комбинация  $\{1, 1, 2, 4\}$  и именно в таком же соответствии будут выбраны модифицируемые биты (то есть у индекса «1» будет выбрана младшая битовая плоскость, у индекса «2» - вторая битовая плоскость, у индекса «4» - третья битовая плоскость). Вероятность этого

события очень невелика. При этом предполагается выполнить следующее действие с одним из индексов:  $1 \rightarrow 2, 2 \rightarrow 1, 4 \rightarrow 3$ , то есть поменять сразу два бита.

Итак, алгоритм защиты с использованием четверки бит строится следующим образом.

Шаг 1. Вычисляется волновое преобразование изображения, представленного в формате *YCbCr*. Выполняется квантование коэффициентов, в результате чего определяются индексы.

Шаг 2. С использованием генератора псевдослучайных чисел находим номера подвергаемых модификации коэффициентов из числа неравных нулю.

Шаг 3. Эти коэффициенты разбиваются на четверки. Для каждой четверки принимается порядок использования в индексах битовых плоскостей:  $\{1, 1, 2, 3\}$ .

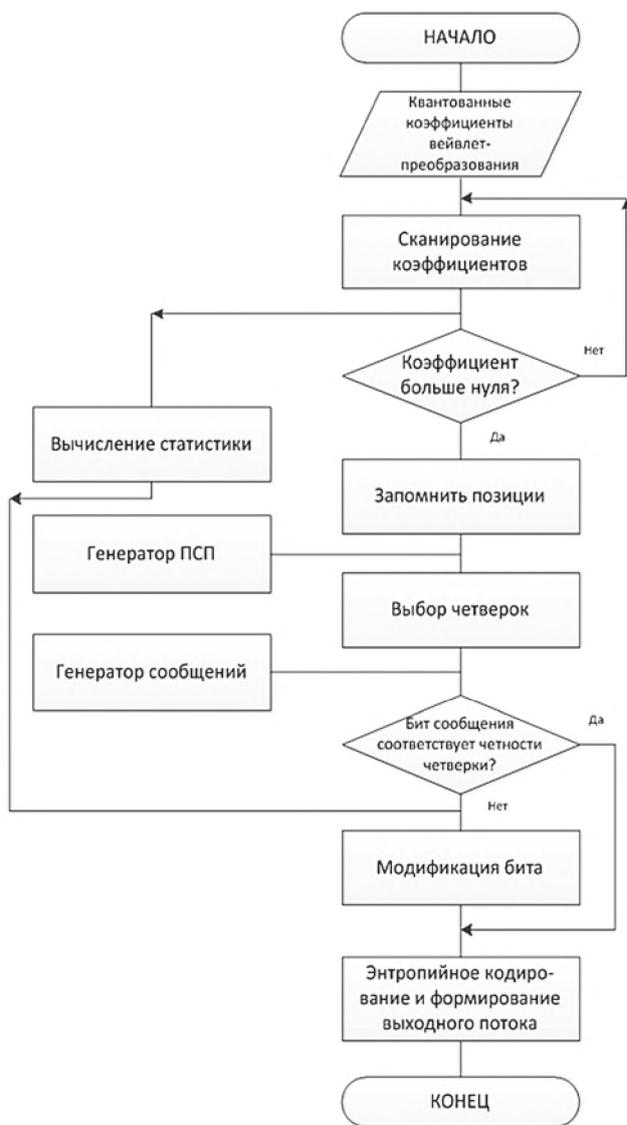


Рис. 3. Алгоритм работы кодера системы скрытия

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Шаг 4. Вычисляются необходимые статистики индексов квантованных коэффициентов субполосвейвлет-преобразования.

Шаг 5. Информационная последовательность делится на отрезки с учетом числа ненулевых индексов в той или иной субполосе.

Шаг 6. В соответствие с битами информационной последовательности и учетом статистики субполос модифицируются биты четверок. При этом примерно в половине четверок изменится 1 бит, а половина - останется неизменной. В случае, если модификация приведет к образованию нулевого индекса, производится одна из замен  $1 \rightarrow 2, 2 \rightarrow 1, 4 \rightarrow 3$ .

Шаг 7. Выполняется арифметическое кодирование индексов и формируется битовый поток JPEG-2000.

Функциональная схема алгоритма кодера представлена на *рисунке 3*, а декодера – на *рисунке 4*. (Другие этапы алгоритма JPEG-2000 не показаны).

### Литература

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

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

3. Коваленко М.П., Букин А.Г., Коваленко А.П. Исследование зависимости числа пригодных для сокрытия информации в изображениях коэффициентов матрицы дискретно-косинусного преобразования от используемой цветовой модели // Известия Института инженерной физики. 2010. №3(17). С. 30-33.

4. Коваленко М.П., Рязанцев А.М., Коваленко А.П. Методика внедрения цифровых водяных знаков в графические изображения на основе искусственных нейронных сетей и генетических



Рис. 4. Алгоритм работы декодера системы скрытия

алгоритмов // Известия Института инженерной физики. 2012. №4(26). С. 2-6.

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

6. Сэлмон Д. Сжатие данных, изображений и звука. М.: Техносфера, 2004. 368 с.

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 612.858.76; 784; 781.1; 53.02

## УНИВЕРСАЛЬНАЯ СИСТЕМА УТРАИВАЮЩИХСЯ ПЕРИОДОВ И МУЗЫКАЛЬНЫЙ СТРОЙ\*

## THE UNIVERSAL PERIOD- TRIPLING SYSTEM AND MUSICAL STRUCTURE

**Валерий Александрович Коломбет**  
*кандидат физико-математических наук*  
заведующий лабораторией  
Институт теоретической и  
экспериментальной биофизики РАН  
Адрес: 142290, Московская обл.,  
г. Пущино, ул. Институтская, д. 3  
Тел.: +7(4967)73-94-64  
Email: kolombet@iteb.ru

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

**Евгений Валерьевич Коломбет**  
младший научный сотрудник  
Институт теоретической и  
экспериментальной биофизики РАН  
Адрес: 142290, Московская обл.,  
г. Пущино, ул. Институтская, д. 3  
Тел. +7(4967)73-94-64  
Email: kvision@mail.ru

### Аннотация

Тесная связь музыкального строя с универсальной системой утраивающихся периодов (УСУП) была описана в одной из наших работ, опубликованных в 2015 г. Частоты музыкальных нот казались тогда средними геометрическими пар близкорасположенных частот, входящих в диапазон слуха и отвечающих двум известным в то время сериям УСУП. Эти две серии различались целочисленным параметром  $m$ ; в одной серии  $m=0$ , в другой  $m=1$ . С тех пор свойства УСУП были изучены более детально, и к настоящему моменту в различных биофизических, медицинских и технических системах уже найдено достаточно много проявлений других частот УСУП при  $m=0$  и  $m=1$ , а также показано существование, по крайней мере, полутора десятка серий УСУП. Целые числа  $m$ , нумерующие серии УСУП, теперь лежат в интервале  $-3 \div 11$ . В новой статье мы показываем, что накопленные новые результаты не нарушили сделанного ранее вывода. В новых условиях серии УСУП с  $m=0$  и  $m=1$  по-прежнему остаются особенными, именно они проявляются наиболее ярко во множестве различных систем, и настройка нот на средние геометрические значения пар близких частот именно этих двух серий УСУП по-прежнему выглядит оправданной.

**Ключевые слова:** универсальная система утраивающихся периодов, формула Петца, музыкальный слух, ноты, настройка музыкальных инструментов.

### Summary

The close connection of the musical system with the universal period-tripling system (UPTS) was described in one of our works published in 2015. That time, the frequencies of musical notes seemed to be the geometric averages of closely spaced pairs of frequencies hitting within the range of hearing and corresponding to the two well-known UPTS series. The integer parameter  $m$  of these two series differed; in one series  $m=0$ , in the other  $m=1$ . Later, UPTS properties were studied in more detail, and to date many manifestations of other UPTS frequencies at  $m=0$  and  $m=1$  have been detected already in various biophysical, medical and technical systems. The existence of at least a dozen UPTS series has been shown. Integer numbers  $m$ , numbering UPTS series, lie in the interval  $-3 \div 11$  now. In the new article, we show that the accumulated new results do not violate the earlier conclusion. The UPTS series with  $m=0$  and  $m=1$  still remain special in the new conditions. They are manifested most clearly in a variety of different systems, and the tuning of notes to the average geometric values of pairs of closely spaced frequencies of these two UPTS series still looks justified.

**Keywords:** the universal period-tripling system, the Puetz's formula, ear for music, musical notes, tuning of musical instruments.

\* Работа выполнена по госзаданию ИЭТБ РАН № госрегистрации 01201351298.

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

## Введение

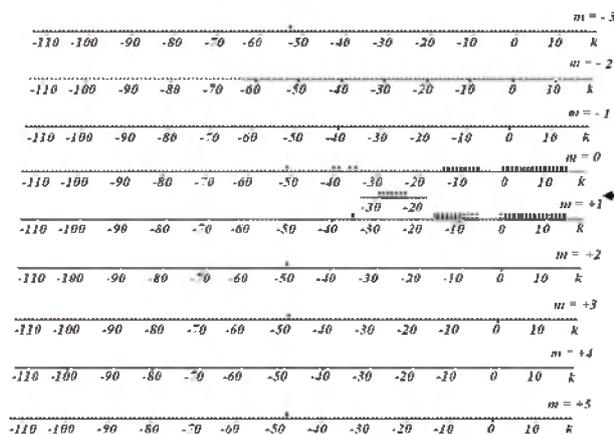
При изучении множества точных значений периодов в астрономических, геофизических, биофизических, биологических, медицинских и технических системах эмпирически выявлена УСУП – двухпараметрическая Универсальная Система Утраивающихся Периодов  $T_{k,m}$  [1-9]. Периоды  $T_{k,m}$  вычисляются по формуле

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

где  $T_0 = 114.5722... \text{ лет}$  [1, 6, 7].

Целочисленный параметр  $k$  надежно выявлен в диапазоне от -51 до +15, но, по-видимому, принимает значения в интервале от -110 до +17. Параметр  $m$  – небольшое целое число или нуль [1-3, 8].

На *рисунке 1* приведена сводка выявленных периодов УСУП для различных значений параметров  $k$  и  $m$ . По мере углубления исследований УСУП эта область периодов будет всё более и более заполняться, и расширяться. На *рисунке 1* следует акцентировать внимание, во-первых, на асимметрии диапазонов отрицательных и положительных значений параметра  $m$ . К настоящему моменту область отрицательных значений параметра  $m$  ограничена значением -3, а область положительных значений параметра  $m$  ограничена значением +11 (из соображения экономии места на рисунке показаны серии лишь до +5, хотя найдены также еще и частоты УСУП, входящие в серии с  $m = +6, +7, +8, +9$  и +11). На *рисунке 1* хорошо видна особо плотная заселенность серий с  $m = 0$  и  $m = +1$ .



**Рис. 1.** Центральный фрагмент сводки периодов  $T_{k,m}$  выявленных к настоящему моменту. Видно, что при  $m=0$  и  $m=1$  количество найденных периодов  $T_{k,m}$  подавляюще доминирует, причем эти серии проявляются фактически с одинаковой интенсивностью. Периоды УСУП в сериях, где  $m$  не равно нулю или единице, обнаруживаются вполне надёжно, однако существенно реже. Стрелка указывает на значение  $m=1/2$ ; здесь располагаются периоды «базовых музыкальных нот», определенных на *рисунке 2*.

Сопоставление спектра фундаментальных частот УСУП

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

с частотами семи музыкальных нот привело к обнаружению удивительной связи этих спектров, уже отмеченной в статье [2]. Спектр изобретенных человеком базовых нот можно аппроксимировать сходной формулой

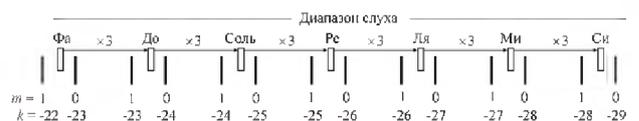
$$T_{k,M}/T_0 = 3^k/2^M,$$

где  $M = 1/2$ . При этом параметр  $T_0$  в обеих формулах совпадает.

Это сходство формул требует повторного анализа и обсуждения в условиях сильно за последнее время проэволюционировавшего представления об УСУП.

## Результаты и обсуждение

На *рисунке 2* представлен описанный ранее в работе [2] результат подстройки к фундаментальным частотам УСУП частот семерки музыкальных нот, возникшей в процессе эволюции пения, а затем и музыки, а также разнообразных музыкальных инструментов. А именно, оказалось, что частоты базовых нот – До, Ре, Ми, Фа, Соль, Ля и Си – тяготеют одновременно и практически в равной степени к ближайшим частотам УСУП, у которых параметр  $m$  принимает значения 0 и 1. Т.е. частоты базовых нот (в английском языке это *the Seven Notes*) принимают значения, практически совпадающие со средними геометрическими значениями этих частот УСУП. В естественном для слуха логарифмическом масштабе частоты базовых нот являются среднеарифметическими значениями соответствующих частот УСУП.



**Рис. 2.** Система «базовых музыкальных нот» (*рисунк 1*) описывается формулой  $T_{k,M}/T_0 = 3^k/2^M$ , идейно близкой к формуле Петца  $T_{k,m}/T_0 = 3^k/2^m$  [6, 7]. Отличие в том, что система музыкальных периодов  $T_{k,M}$  изображенная на *рисунке 2*, смещена относительно  $T_{k,m}$  в середину между сериями  $m=0$  и  $m=1$ . При т.н. классической настройке музыкальных инструментов, где нота Ля первой октавы настраивается не на 440 Гц, как на *рисунке 2*, а на 430-432 Гц, параметр  $M$  заметно точнее совпадает с  $1/2$ . Разнесение вычисленных нот в другие октавы, т.е. умножение или деление на целочисленные степени двойки приводит к полуцелым значениям параметра  $M$ , т.е. к  $M = \dots -7/2, -5/2, -3/2, -1/2, 1/2, 3/2, 5/2, 7/2, \dots$

Из *рисунка 2* видно, что последовательные утращения  $T_{k,M}$  – это последовательные формирования очередных нот с ростом параметра  $k$ : ..., Фа, До, Соль, ... Пифагорейский алгоритм формирования частот ведет к стохастическому аттрактору окта-

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

вы, т.н. странному аттрактору, обеспечивающему бесконечное число «нот» в октаве. Двенадцать нот в октаве – это известное и вполне оправданное преднамеренное огрубление спектра аттрактора, подстройка результата под довольно курые возможности человека – как музыканта, так и слушателя. «Экспериментальные» периоды  $T_{k,m}$  базовых нот находятся в серединах пар «теоретических» периодов УСУП для серий  $m=0$  и 1.

Деления и умножения  $T_{k^{1/2}}$  на двойку в различных целых степенях означают копирования в разные октавы нот, в частности, изображенных на *рисунке 2*. При этом все музыкальные ноты, соответствующие белым клавишам рояля, попадут на *рисунке 1* в середины промежутков между соседними сериями УСУП. Ноты, соответствующие черным клавишам рояля, генерируются тем же механизмом, что и приведенный на *рисунке 2*, но соответствующие базовые ноты лежат уже вне диапазона человеческого слуха, т.е. в ультразвуковом и инфразвуковом диапазонах. В пифагорейском строе они могут отвечать черным клавишам рояля после соответствующего деления или умножения этих базовых частот на целочисленные степени двойки.

Поскольку частоты УСУП – это фундаментальный физический феномен, то изобретенный человеком набор частот, используемый в музыке, хотя и не может сравниться по фундаментальности с частотами УСУП, охватывающими всевозможные периодические явления, но, по крайней мере, опирается непосредственно на фундаментальный уровень, имманентно присутствующий частотам УСУП. Таким образом, в музыкальном строе не может быть большого произвола. По-видимому, все музыкальные течения, поначалу архаические, имеющие случайные черты, с течением времени начинают в той или иной мере все более проявлять тенденцию к эволюции в направлении, куда уже несколько столетий назад пришла европейская музыка.

Из сводки, приведенной на *рисунке 1*, можно заключить, что музыкальное ухо человека в процессе эволюции пения, а потом и музыки невольно попыталось настроиться на среднюю частоту серий УСУП с  $m=0$  и  $m=1$  [2]. Большинство других процессов – астрономических, геофизических, биофизических, биологических, медицинских, технических – тоже оказалось чувствительным к периодике УСУП [1-9]. Естественно, что все эти процессы подстраивались к  $T_{k,m}$  (или отстраивались от них) пассивно, вынужденно. Только лишь человек – на данном этапе эволюции еще сильно ограниченный в возможностях, но активный по своей природе – смог радикально упростить ситуацию, интуитивно определив средние значения пар логарифмов близких  $T_{k,m}$ , попавших в диапазон слуха, и

создал на этой основе семь базовых нот – фундамент современной музыки. (Логарифмический закон естественен для биологических сенсоров, это отражено в форме известного закона Вебера-Фехнера (см. [10]). При этом человек избавился от перспективы сверхсложной музыки УСУП с 24 нотами в октаве, содержащей два аналога До, два аналога Ре и т.д. (ср. с *рисунком 2*).

### Выводы

Таким образом, новые данные, накопленные к настоящему моменту по теме УСУП, несколько не нарушили выводов, сделанных ранее в статье [2], т.е. серии УСУП с  $m=0$  и  $m=1$  по-прежнему остаются особенными, главными. Вывод о настройке частот базовых нот различных музыкальных инструментов на окрестности среднегеометрических значений пар близких частот двух указанных серий УСУП остается по-прежнему в силе.

### Литература

1. Puetz Stephen J., Prokoph Andreas, Borchardt Glenn, Mason Edward W. Evidence of synchronous, decadal to billion year cycles in geological, genetic, and astronomical events. *Chaos, Solitons & Fractals*. 2014. V. 62-63. P. 55–75.
2. Бондарь А.Т., Федоров М.В., Коломбет В.А. Утраивающиеся периоды в мультимасштабных физических и биологических явлениях // *Биофизика*, 2015. Т. 60. № 6. С. 1208-1215.
3. 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. Т. 61. № 3. С. 615-624.
4. Коломбет Е.В., Лесных В.Н., Коломбет В.А. Особенность проявления фрактальной системы утраивающихся периодов в телевидении и мобильной телефонии // *Известия Института инженерной физики*, 2016. №4(42). С. 34-40.
5. Коломбет Е.В., Лесных В.Н., Скавуляк А.Н., Коломбет В.А., Бондарь А.Т. Проявление универсальной системы утраивающихся периодов в УВЧ терапии // *Известия Института инженерной физики*, 2017. №2(44). С. 70-73.
6. Puetz S.J., Borchardt G. Quasi-periodic fractal patterns in geomagnetic reversals, geological activity, and astronomical events. *Chaos, Solitons and Fractals*. 2015. V. 81 P. 246-270.
7. Puetz S.J., Prokoph A., Borchardt G. Evaluating alternatives to the Milankovitch theory. *Journal of Statistical Planning and Inference*. 2015. doi:10.1016/j.jspi.2015.10.006.
8. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Станкевич А.А., Milian-Sanchez V. Наблюдение «музыки сфер» во всей области, заключенной между планковским и космологическим масштабами времени. Система «Планета Земля». М.: ЛЕНАРД, 2018. С. 146-161.
9. Коломбет В.А. Обнаружение частот Пиза в когнитивных процессах. Материалы всероссийской конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях». 25-29 сентября 2017 г., Нижний Новгород, ИПФ, с. 126-128.
10. Stevens S.S. On the psychophysical law. *Psychological Review*. 1957. Т. 64(3). P. 153-181.

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.056.53

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛОЖНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ – ПЕРСПЕКТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ОТ АТАК «НУЛЕВОГО» ДНЯ

## USE OF A COMPLEX INFORMATION SYSTEMS IS A PROMISING DIRECTION OF INFORMATION SYSTEMS PROTECTION FROM ZERO-DAY ATTACKS



**Алексей Викторович Каракашев**

аспирант  
начальник отдела ЗТСиК  
МОУ «ИИФ»  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: 8 (910) 442-18-81  
E-mail: lexusnikita@gmail.com

**Ярослав Дмитриевич Смирнов**

научный сотрудник  
МОУ «ИИФ»  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7 (4967) 35-31-93

### Аннотация

В настоящее время основные способы решения задачи защиты информационных систем от несанкционированного доступа основываются на применении «стратегии запрета». Постепенно при защите информационных систем актуальным становится применение «стратегии обмана» и отвлечения нарушителя на ложные ресурсы.

**Ключевые слова:** информационная система, несанкционированный доступ, защита информации, уязвимость, стратегия обмана, механизмы защиты.

### Summary

Currently, the main ways of solving the problem of information systems protection against unauthorized access are based on applying "the strategy of prohibition". Gradually in the information systems protection is becoming urgent applying the "strategy of deception" and distract the intruder on false resources.

**Keywords:** information system, unauthorized access, data protection, vulnerability, fraud strategy, protection mechanisms.

В настоящее время основные способы решения задачи защиты информационных систем (ИС) от несанкционированного доступа (НСД) основываются на применении стратегии «запрета».

Потенциальные возможности нарушителя при использовании уязвимости нейтрализуется за счет использования средств защиты информации (СЗИ), таких как межсетевые экраны, системы обнаружения вторжений или средства антивирусной защиты, которые делают невозможным эксплуатацию данной уязвимости для реализации НСД.

Стратегия «запрета» оказывается неэффективной против неизвестных или еще незакрытых уязвимостей (уязвимостей «нулевого дня»). Это связано с тем, что после появления информации об уязвимости разработчику необходимо время на ее устранение, а администраторам безопасности необходимо время на обновление ПО и в реальности проходит большое количество времени, в течение которого система оказывается уязвимой для НСД. Для корпоративных программных продуктов, разрабатываемых на заказ, такие уязвимо-

сти могут существовать очень длительное время, поскольку для их устранения зачастую нужно заключать новый контракт.

Правильно настроенные СЗИ делают эксплуатацию нарушителем некоторых из таких уязвимостей невозможной, тем не менее всегда остается вероятность наличия неустраненных уязвимостей, а также уязвимостей в ПО самих средств защиты.

Постепенно при защите ИС актуальным становится применение стратегии «введения в заблуждение» и отвлечения нарушителя на ложные ресурсы. Повышение общего уровня защищенности информации ограниченного доступа достигается за счет создания для нарушителя условий неопределенности о составе и структуре атакуемой им ИС. Для этого наряду с применением традиционных СЗИ (межсетевых экранов, систем обнаружения вторжений, антивирусных средств и др.) используются средства, реализующие методы сокрытия объектов доступа и имитации деятельности субъектов доступа.

Реализуя стратегию «введения в заблуждение» нарушителя и отвлекая его на ложный информа-

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ционный ресурс, можно не только не позволить злоумышленнику получить НСД к защищаемой информации, но и найти неизвестные ранее уязвимости ПО. Необходимость применения обманных систем (систем-ловушек, систем-имитаторов), реализующих такую стратегию и называемых ложными информационными системами (ЛИС), отмечается и в документах ФСТЭК России [1].

Развитию практики применения ЛИС способствует все большее внедрение технологии виртуализации, поскольку иначе на обеспечение функционирования ЛИС будет задействован значительный вычислительный ресурс. Срыв НСД достигается за счет того, что нарушитель или инициированный им процесс доступа (например, с использованием вредоносной программы) переориентируется на ложные, созданные в виртуальной среде объекты (эмулируемые с помощью виртуальных машин компьютеры) в составе компьютерной сети, подключенной к сети общего пользования.

Для определения места и роли стратегии «введения в заблуждение» рассмотрим последовательность фаз реализации атаки на компьютерную сеть, так называемый жизненный цикл инцидента безопасности, и механизмы защиты информации на каждой фазе выполнения атаки. Основными фазами жизненного цикла любого инцидента безопасности являются (рисунки 1) [3]:

1. угроза безопасности;
2. реализация угрозы и возникновение инцидента;
3. нанесение ущерба;
4. восстановление ресурсов защищаемой системы после нанесения ущерба.



**Рис. 1.** Цикл инцидента безопасности

На каждой фазе жизненного цикла инцидента безопасности традиционно используются СЗИ согласно стратегии «запрета». Средства защиты информации, вводящие нарушителя в заблуждение, используются на этапе возникновения инцидента безопасности, когда нарушитель уже воспользовался незакрытой уязвимостью (уязвимостью «нулевого дня»). Данным средствам защиты уделяется недостаточное внимание, однако ее реализация позволит повысить защищенность ИС против внешних и внутренних вторжений.

Рассмотрим некоторые возможные варианты построения защиты ИС с помощью ЛИС.

## 1. Линейная защита

Простейшим вариантом защиты ИС с использованием ЛИС является добавление в компьютерную сеть из  $N_{TR}$  объектов некоторого количества ЛИС  $N_F$  с тем, чтобы уменьшить вероятность атаки на защищаемый ресурс [2].

Эффективность ЛИС как средства защиты рассчитывается с использованием разностного показателя [2]:

$$\eta_{\Delta}(t) = P_{D^{(1)}}(t) - P_{D_{\text{ЛИС}}^{(1)}}(t) \quad (1)$$

или относительно-разностного показателя:

$$\eta(t) = \frac{P_{D^{(1)}}(t) - P_{D_{\text{ЛИС}}^{(1)}}(t)}{P_{D^{(1)}}(t)} = 1 - \frac{P_{D_{\text{ЛИС}}^{(1)}}(t)}{P_{D^{(1)}}(t)}, P_{D^{(1)}}(t) > 0 \quad (2)$$

где

$P_{D^{(1)}}(t)$  – вероятность, что в условиях отсутствия ЛИС за время  $t$  нарушитель сумеет получить НСД к  $I$  объектам (компьютерам) в составе ИС;

$P_{D_{\text{ЛИС}}^{(1)}}(t)$  – вероятность, что в условиях наличия ЛИС за время  $t$  нарушитель сумеет получить НСД к  $I$  объектам (компьютерам) в составе ИС.

## 2. Активная защита со статическими ЛИС

Поступающие сетевые запросы из сети общего пользования, к которой подключена защищаемая ИС, обрабатываются межсетевым экраном (МЭ). Далее система обнаружения вторжений (СОВ) анализирует пропущенные и отброшенные сетевые пакеты и распределяет эти запросы между целевой и ложной ИС. Средства виртуализации ИС применяются только для представления компонентов ЛИС в виде виртуальных машин. Причем, расположение и сетевые адреса виртуальных машин задаются вручную при создании ЛИС и в дальнейшем не изменяются [2]:

Недостатками статических ЛИС являются:

- неизменяемость первоначальной конфигурации ЛИС (нарушитель при анализе характеристик сетевого трафика может установить ложность её компонентов);
- неэффективны для атак из внутреннего сегмента сети;
- не позволяют обеспечить противодействие неизвестным для СОВ видам атак.

## 3. Активная защита с динамическими ЛИС

В схему можно внести дополнительный элемент – средство управления виртуальной инфраструктурой (СУВИ), включающую распределенные виртуальные коммутаторы, а также средства перемещения и конфигурирования виртуальных машин [2].

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Распределенные виртуальные коммутаторы являются логическими объектами СУВИ - согласуют работу виртуальных коммутаторов каждого сервера, входящего в состав ИС (виртуальный коммутатор обеспечивает распределение сетевого трафика между VM, располагаемыми на одном сервере, управляемом гипервизором).

Средство перемещения (миграции) VM перемещает VM между серверами ИС, причем без нарушения функционирования VM.

Средство конфигурирования VM периодически изменяет сетевые и аппаратные адреса VM целевой и ложной ИС с целью усложнения процедуры анализа сетевого трафика нарушителем. Изменение конфигурации VM может быть инициировано СОВ.

Недостатками динамических ЛИС являются:

- наличие сведений в СУВИ о расположении компонентов ЛИС;
- затрат вычислительных ресурсов ИС для перемещения VM;
- возможность демаскирования компонент ЛИС за счет анализа нарушителем команд на перемещение и изменение адресов VM.

#### 4. Активная защита по теории игр

При решении задач, связанных с обеспечением информационной безопасности, широкое применение находит математический аппарат теории игр. Теория игр является формальным подходом, предназначенным для анализа взаимодействий между несколькими участниками игры - сторона нападения и сторона защиты, в качестве которой выступают СЗИ целевой ИС [4].

Обычно рассматриваются 2 игровые модели:

- моделирование взаимодействия сторон для конкретной атаки (злоумышленник атакует цель нападения);
- моделирование взаимодействия сторон до проведения атаки (злоумышленник, анализируя сеть, выбирает цель нападения).

Первая модель позволяет определить число «приманок», размещаемых в ЛИС, и их конфигурацию. Вторая модель включает в рассмотрение стратегию зондирования, целью которой является обнаружение ЛИС в реальной сети.

Существенным недостатком перечисленных подходов к построению и оценке защищенности информационной системы является предположение, что в качестве ложных информационных объектов и систем используются полноценные реальные информационные объекты и системы. Введение в заблуждение потенциального нарушителя будет осуществляться только в части структуры и адресации сети, а также в части тестовой информации. Это увеличивает стоимость

реализации защиты и ограничивает специалистов по безопасности в методах и средствах по отслеживанию нарушителя, построению шаблона поведения нарушителя.

Для увеличения защищенности информационных систем целесообразно автоматизированное развертывание информационных сетей из ложных информационных объектов, в которых в качестве ложных используются не настоящие информационные объекты (операционные системы, корпоративное ПО и тому подобное), а имитация этих объектов с некоторой глубиной проработки основного функционала для экономии ресурсов серверного оборудования (см. стрелку «Введение в заблуждение» на рисунке 1). В таких системах уделено повышенное внимание к имитации наиболее важных подсистем, а менее важные подсистемы реализуются не полностью.

Для оценки защищенности информационной системы при использовании таких ЛИС необходимо учитывать степень имитации реальных подсистем (таких как операционная система, корпоративное ПО и т. п.) в ложной информационной системе.

Для оценки полноты имитации реальных подсистем информационной системы вводим коэффициент имитации  $K$ , принимающий значения от 0.0 до 1.0:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^m (F_i)}{m} \quad (3)$$

где  $m$  – количество имитируемых подсистем;  
 $F_i$  — показатель полноты имитации  $i$ -й подсистемы, принимающий значения от 0.0 до 1.0;

$$F_i = \frac{\sum_{j=1}^z (G_j)}{z} \quad (4)$$

где  $z$  – количество функций, выполняемых  $i$ -й подсистемой;

$G_j$  - показатель полноты имитации  $j$ -й функции из состава  $i$ -й подсистемы (принимает значения от 0.0. до 1.0).

Очевидно, что в условиях наличия ЛИС вероятность получения нарушителем доступа к защищаемым объектам за время  $t$  уменьшается при увеличении полноты имитации ЛИС.

#### Литература

1. ФСТЭК России. «Требования о защите информации, не составляющей государственную тайну, содержащейся в государственных информационных системах».
2. Сердечный А.А. Инновационный подход к защите информации в виртуальных вычислительных сетях, основанный на стратегии обмана // Вопросы кибербезопасности, 2014. № 1 (2).
3. Котенко И.В., Степашкин. М.В. Обманные системы для защиты информационных ресурсов в компьютерных сетях // Труды СПИИРАН. Вып. 2. Т.1. СПб.: СПИИРАН, 2004.
4. Шматова Е.С. Выбор стратегии ложной информационной системы на основе модели теории игр // Вопросы кибербезопасности, 2015. №5(13).

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.056.55

### УПРАВЛЕНИЕ ЗАПАСАМИ КЛЮЧЕЙ КРИПТОГРАФИЧЕСКОГО ОБМЕНА НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА НЕЧЕТКОГО ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА СУГЕНО

### MANAGEMENT OF CRYPTOGRAPHIC EXCHANGE KEYS STOCK BASED ON THE FUZZY LOGIC ALGORITHM OF SUGENO

#### Павел Евгеньевич Стародубцев

начальник управления аппаратно-  
программных комплексов  
МОУ «ИИФ»  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: 8(4967)35-31-93  
E-mail: starodoubtsev@inbox.ru

#### Евгений Олегович Бухаров

кандидат технических наук  
заместитель начальника научно-  
исследовательского отдела  
Краснодарское высшее военное училище  
имени генерала армии С.М. Штеменко  
Адрес: 350063, г. Краснодар, ул. Красина, д.4  
Тел.: +7 (909) 456-62-09  
E-mail: coster@list.ru

#### Евгений Петрович Соколовский

кандидат технических наук  
начальник научно-исследовательского отдела  
Краснодарское высшее военное училище  
имени генерала армии С.М. Штеменко  
Адрес: 350063, г. Краснодар, ул. Красина, д.4  
Тел.: +7 (938) 519-25-53  
E-mail: biryza\_08@mail.ru

#### Аннотация

Для обеспечения непрерывности обмена сообщениями между абонентами, использующими симметричный криптографический протокол, необходимо создавать некоторый запас ключей. Предлагается подход к решению задачи управления запасами криптографических ключей на основе известного алгоритма нечеткого логического вывода Сугено.

**Ключевые слова:** криптографические алгоритмы, управление запасами ключей криптографического обмена, алгоритм нечеткого логического вывода Сугено.

#### Summary

To ensure continuity of messaging between subscribers using a cryptographic protocol, it is necessary to create some margin keys. The paper proposes an approach to solving the inventory management problems of cryptographic keys based on the well-known algorithm of Sugeno fuzzy inference.

**Keywords:** cryptographic algorithms, inventory management of cryptographic key, exchange algorithm of Sugeno fuzzy inference.

Информация как объект публичных, гражданских и иных правовых отношений может свободно использоваться любым лицом и передаваться одним лицом другому лицу, если федеральными законами не установлены ограничения доступа к ней, либо иные требования к порядку ее представления или распространения [1].

В зависимости от категории доступа информация подразделяется на общедоступную ин-

формацию, а также на информацию, доступ к которой ограничен федеральными законами (информация ограниченного доступа), соблюдение конфиденциальности которой, является обязательным требованием для участников отношений.

Решения по защите информации ограниченного доступа в информационных (автоматизированных) системах учреждений, организаций

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

и предприятий реализуются в рамках системы защиты информации, одной из подсистем которой, является криптографическая подсистема, обеспечивающая:

- защищенный документооборот (на основе электронной подписи);
- шифрование централизованных баз данных и других хранилищ данных коллективного использования, хранимых и обрабатываемых в центрах обработки данных;
- шифрование данных, циркулирующих в локальных вычислительных сетях в рамках конкретного объекта – одной контролируемой зоны;
- шифрование данных, циркулирующих между объектами сети, находящимися в различных контролируемых зонах.

Выполнение указанных функций осуществляется с использованием криптографических методов защиты информации – специальных методов шифрования, кодирования или иного преобразования информации, в результате которого ее содержание становится недоступным без предъявления ключа и обратного преобразования [2].

Соответственно для реализации преобразований и обеспечения защищенного обмена информацией между участниками информационных отношений необходимо распределять ключи – физические носители, содержащие специальные параметры криптографического протокола [3].

Отсутствие у злоумышленника информации о значении ключа является необходимым условием стойкости криптографических протоколов [4].

Распределение и доставка ключей с соблюдением всех необходимых мер конфиденциальности между участниками информационного обмена в ряде случаев является нетривиальной задачей [5]. Для уменьшения издержек, связанных с распространением ключей, абонентам целесообразно создавать некоторый запас ключей  $X$ , обеспечивающий непрерывность обмена сообщениями в течение заданного периода времени  $T$ . Размер запаса ключей  $X$  должен быть не слишком большим, чтобы не увеличивать издержки, связанные с их хранением.

Известно [6], что для исследования слабоструктурированных проблем применимы положения нечеткой логики, основными особенностями которой, в отличие от классической, являются максимальная приближенность к отражению реальности в результатах вычислений с ее использованием.

Для описания нечетких множеств вводятся лингвистические переменные, состоящие из:

- названия, например, «запас ключей»;
- множества своих значений (базового терм-множества), например, «недостаточный», «достаточный», «излишествующий»;
- универсального множества, например,  $X=[0;15]$  ключей;
- синтаксического правила  $R$ , по которому генерируются новые термы с применением слов естественного или формального языка;
- семантического правила  $P$ , которое каждому значению лингвистической переменной ставит в соответствие нечеткое подмножество множества  $X$  [7].

Основой проведения операции нечеткого логического вывода является база правил, содержащая нечеткие высказывания в форме «если – то»:  $R_i$ : если  $x_1$  это  $A_{i1}$  ... и  $x_n$  это  $A_{in}$  ... то  $y$  это  $B_i$ , где  $x_k, k = 1 \dots n$  – входные переменные;  $y$  – выходная переменная;  $A_{ik}$  – заданные нечеткие множества с функциями принадлежности.

Результатом нечеткого вывода является четкое значение переменной  $y^*$  на основе заданных значений  $x_k, k = 1 \dots n$ .

Для решения задачи управления запасами ключей предлагается использовать алгоритм нечеткого логического вывода Сугено [7], который, в общем виде, можно представить последовательностью шагов.

**Шаг 1.** Экспертным путем определяются правила:

$$\begin{aligned} R_1: \text{если } X \text{ есть } A_1 \text{ и если } Y \text{ есть } B_1, \text{ то } z = a_1x + b_1y, \\ R_2: \text{если } X \text{ есть } A_2 \text{ и если } Y \text{ есть } B_2, \text{ то } z = a_2x + b_2y. \end{aligned} \quad (1)$$

**Шаг 2.** Находятся степени истинности для предпосылок каждого из правил:

$$A_1(x_0), A_2(x_0), B_1(y_0), B_2(y_0) \quad (2)$$

**Шаг 3.** Находятся уровни «отсечения»:

$$\alpha_1 = A_1(x_0) \wedge B_1(y_0), \alpha_2 = A_2(x_0) \wedge B_2(y_0), \quad (3)$$

и индивидуальные выходы правил:

$$z_1^* = a_1x_0 + b_1y_0, \quad z_2^* = a_2x_0 + b_2y_0. \quad (4)$$

**Шаг 4.** Определяется четкое значение выходной переменной:

$$z_0 = \frac{\sum_{j=1}^n \alpha_j z_j}{\sum_{j=1}^n \alpha_j} \quad (5)$$

Допустим, что в закрытой корпоративной сети обмениваются сообщениями три абонента ( $A, B, C$ ). Абонент  $A$  обеспечивает однократно в течение периода времени  $T$  ключами абонентов  $B$  и  $C$ . Интенсивность обмена сообщениями между абонентами  $A$  и  $B$  – высокая, а между абонентами  $A$  и  $C$  – невысокая.

Задача заключается в определении такого размера заказа ключей  $x_0$  абонентом  $A$  на начало очередного периода времени  $T$ , чтобы уменьшить издержки, связанные с хранением излишествующего запаса ключей, и обеспечить

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

непрерывность обмена сообщениями с абонентами  $B$  и  $C$ .

На основании (1) экспертным путем определены правила:

●  $R_1$ : если запас ключей  $X$  достаточный и расход ключей  $Y$  большой, то заказ ключей  $z$  на очередной период времени  $T$  должен быть большой;

●  $R_2$ : если запас ключей  $X$  достаточный и расход ключей  $Y$  небольшой, то заказ ключей  $z$  на очередной период времени  $T$  должен быть небольшой.

Используя метод экспертных оценок, получим функции принадлежности для понятий «запас ключей  $X$  достаточный», «расход ключей  $Y$  большой» и «расход ключей  $Y$  небольшой» (рисунки 1 а, б).

Используя (2) и графические зависимости (рисунки 1) при  $x_0 = 6$  и  $y_0 = 5$  определим степени истинности для предпосылок каждого из правил  $R_1$  и  $R_2$ :

$$\begin{aligned} A_1(x_0) &= A_2(x_0) = 0.6; \\ B_1(y_0) &= 0.43; \\ B_2(y_0) &= 0.56. \end{aligned}$$

Согласно (3) определим уровни «отсечения»:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= A_1(x_0) \wedge B_1(y_0) = 0.43; \\ \alpha_2 &= A_2(x_0) \wedge B_2(y_0) = 0.56, \end{aligned}$$

Тогда в соответствии с (4) получим:

$$z_1^* = 5.76; \quad z_2^* = 6.43.$$

На основании (5) определим размер заказа ключей  $z_0 = 6.144 \approx 6$  (ключей) абонентом  $A$  на очередной период времени  $T$ . Учитывая интенсивность обмена сообщениями, целесообразно у абонента  $B$  – создать запас 4 ключа, у абонента  $C$  – 2 ключа.

Таким образом, использование алгоритма нечеткого логического вывода Сугено позволит определить размер необходимого запаса ключей криптографических протоколов с учетом интенсивности обмена сообщениями между абонентами.

Погрешность полученных результатов определяется достоверностью исходных данных, которые, как правило, имеют значительную степень неопределенности вследствие:

- неполноты знаний о проблеме, по которой принимается решение;
- невозможности точного учета реакции окружающей среды на предпринимаемые действия;
- неточности понимания цели лицом, принимающим решение

### Литература

1. Федеральный закон от 27.07.2006 г. №149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации».

2. Грибунов В.Г., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Криптография и безопасность цифровых систем: Учебное пособие. Саратов: ФГУП «РЯЦ-ВНИИЭФ», 2011. 411 с.

3. Яценко В.В. Введение в криптографию / Под общ. ред. В.В. Яценко. 4-е изд., доп. М.: МЦНМО, 2012. 348 с.

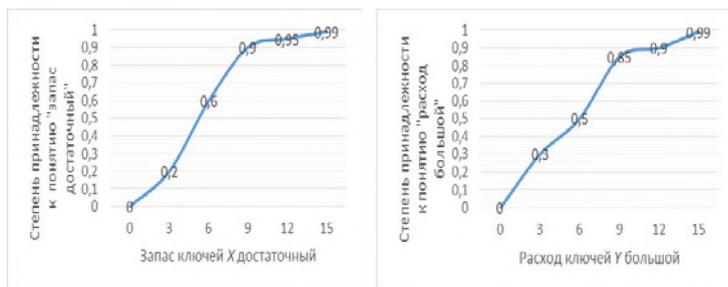
4. Kerckhoffs A. La cryptographie militaire // Journal des sciences militaires, Vol. IX. Jan. 1883. P.5-38.

5. Баричев С.Г., Гончаров В.В., Серов Р.Е. Основы современной криптографии. М.: Горячая линия – Телеком, 2001. 208 с.

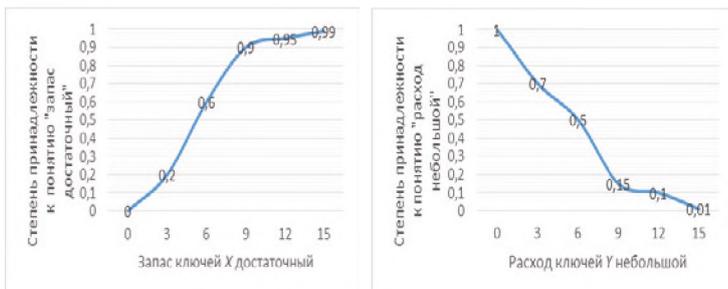
6. Финаев В.И. Модели систем принятия решений. Учебное пособие. Таганрог: ТРТУ, 2005. 118 с.

7. Штовба С.Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику [электронный ресурс]. <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/index.php>.

а) правило  $R_1$



б) правило  $R_2$



**Рис. 1.** Функции принадлежности, полученные методом экспертных оценок, для понятий «запас ключей  $X$  достаточный», «расход ключей  $Y$  большой» и «расход ключей  $Y$  небольшой»

УДК 37.012

### ОБОБЩЕННАЯ ОЦЕНКА СООТВЕТСТВИЯ НАУЧНЫХ ИЗДАНИЙ ТРЕБОВАНИЯМ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫМ К РЕЦЕНЗИРУЕМЫМ НАУЧНЫМ ИЗДАНИЯМ

### GENERALIZED ASSESSMENT OF COMPLIANCE OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS WITH THE REQUIREMENTS FOR PEER-REVIEWED SCIENTIFIC PUBLICATIONS



**Николай Михайлович Емелин**

заслуженный деятель науки и техники РСФСР  
доктор технических наук, профессор  
главный научный сотрудник  
ФГБНУ «Госметодцентр»  
Адрес: 117997, Москва, ул. Люсиновская, д. 51  
Тел.: +7(499)706-81-24

**Владимир Петрович Карулин**

заслуженный работник высшей школы РФ  
доктор технических наук, профессор  
ведущий научный сотрудник  
ФГБНУ «Госметодцентр»  
Адрес: 115997, Москва, ул. Люсиновская, д.51  
Тел.: +7 (499) 706-81-25

#### Аннотация

В статье рассматриваются предложения по порядку получения количественных оценок научных изданий, обеспечивающих возможность определения объективного рейтинга издания. В основу предлагаемого порядка оценки соответствия рецензируемого научного издания предъявляемым требованиям положена обобщенная количественная оценка степени проявления признаков, характеризующих издание.

**Ключевые слова:** научные издания, научные специальности, отрасли науки, перечень научных изданий, редакционная коллегия, требования ВАК.

#### Summary

The article considers proposals on the procedure for obtaining quantitative estimates of scientific publications that provide an opportunity to determine the objective rating of the publication. The proposed procedure for assessing the compliance of the reviewed scientific publication with the requirements is based on the generalized quantitative assessment of the degree of manifestation of signs characterizing the publication.

**Keywords:** scientific publications, scientific specialties, branches of knowledge, a list of scientific publications, the editorial board, the requirements of the Higher Attestation Commission.

Одним из важнейших направлений модернизации системы аттестации научных кадров высшей квалификации является ужесточение требований по опубликованию и обсуждению основных научных результатов диссертаций, в том числе разработка новых, более жестких, требований к научным изданиям, в которых рекомендована публикация основных результатов диссертаций, и пересмотр на их основе действующего Перечня рецензируемых научных изданий, в которых рекомендована публикация основных результатов диссертаций [1].

В данной статье рассматривается порядок получения количественных оценок научных изданий, который создаст возможность объективного их рейтингования. Отдельные подходы к оценке научного издания, применяемые к изданиям, в которых публикуются основные научные результаты диссертаций, приведены в работах [2-6]. В основу предлагаемого порядка оценки соответствия рецензируемого научного

издания предъявляемым требованиям положена обобщенная количественная оценка степени проявления признаков, характеризующих:

- значимость (важность) издания;
- соответствие рубрик издания заявленным научным специальностям и отраслям науки, по которым присуждаются ученые степени;
- соответствие научных статей журнала заявленным группам научных специальностей/научным специальностям и доля научных статей в научном издании;
- научный уровень («научность») опубликованных статей;
- качественный состав редакционной коллегии и/или редакционного совета научного издания.

Выявление степени проявления отдельных признаков, характеризующих соответствие рецензируемого научного издания предъявляемым требованиям, предлагается проводить с использованием существующих механизмов получения экспертных оценок.

## ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЕКТЫ

Так, например, для получения оценки качественного состава редакционного совета/редакционной коллегии в ходе экспертизы целесообразно учитывать следующие факторы:

1. Членство в государственных академиях наук, ученую степень, ученое звание.

2. Выполнение ограничения на закрепление одного члена редакционной коллегии/редакционного совета не более чем за 3 научными специальностями и соответствующими им отраслями науки.

3. Выполнение требования по наличию в состав редакционной коллегии/редакционного совета по каждой научной специальности и соответствующей ей отрасли науки не менее 3 докторов наук.

4. Обоснование значительного вклада каждого члена редакционной коллегии/редакционного совета в развитие соответствующей области знаний:

5. Сведения о научных публикациях в изданиях, входящих в одну из международных реферативных баз данных и систем цитирования: Web of Science, Scopus, PubMed, MathSciNet, zbMATH, Chemical Abstracts, Springer, GeoRef;

■ сведения о научных публикациях в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук;

■ сведения о показателях РИНЦ:

- число публикаций;
- число ссылок на публикации;
- индекс Хирша;
- средняя цитируемость одной статьи.

Аналогично для каждого признака оцениваемого научного издания рассматривается своя совокупность факторов, которая в результате проведенной экспертизы получает качественную оценку степени своего проявления.

При этом количественная оценка степени проявления признаков определяется бальными оценками, соответствующими каждому из рассматриваемых признаков [7]:

- «5» – высокая, если данный признак полностью проявляется;
- «4» – хорошая, если данный признак проявляется не полностью;
- «3» – удовлетворительная, если данный признак проявляется слабо;
- «2» – низкая, если данный признак не проявляется.

Полученные в результате экспертизы бальные оценки по каждому признаку, характеризую-

щему соответствие рецензируемого научного издания предъявляемым требованиям, являются базой для получения обобщенной оценки.

Обобщенная оценка степени соответствия рецензируемого научного издания предъявляемым требованиям по заявленной группе научных специальностей/научной специальности ( $\bar{s}$ ) представляет собой средневзвешенный балл:

$$\bar{s} = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1}^m k_i \sum_{j=1}^n s_{ij}, \quad (1)$$

где  $s_{ij}$  – бальная оценка  $j$ -го эксперта степени соответствия научного издания  $i$ -му признаку;

$n$  – количество экспертов по группе специальностей/специальности;

$k_i$  – коэффициент важности  $i$ -го признака, определяемый экспертами по правилу:

- «5» – если  $i$ -й признак «очень важный»;
- «4» – если  $i$ -й признак «важный»;
- «3» – если  $i$ -й признак «менее важный»;
- «2» – если  $i$ -й признак «неважный».

$m$  – количество рассматриваемых признаков.

Шаблон для определения степени соответствия рецензируемого научного издания предъявляемым требованиям по заявленной группе научных специальностей/научной специальности представлен на рисунке 1.

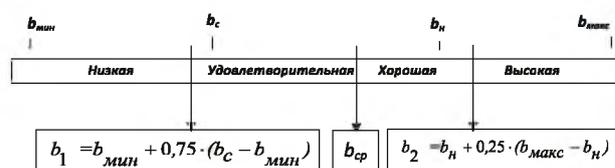


Рис. 1. Шаблон для определения степени соответствия

На рисунке представлены следующие обозначения:

- $b_{мин}$  – средневзвешенный балл для случая отсутствия всех признаков соответствия;
- $b_c$  – средневзвешенный балл для случая слабого проявления всех признаков соответствия;
- $b_n$  – средневзвешенный балл для случая неполного проявления признаков соответствия;
- $b_{макс}$  – средневзвешенный балл для случая полного проявления признаков соответствия.

Определение величин  $b_{мин}$ ,  $b_c$ ,  $b_n$ ,  $b_{макс}$  производится путем последовательного подставления в (1) одинаковых оценок для каждого признака, соответствующих данной степени их проявления

$$b_{мин} = 2, b_c = 3, b_n = 4, b_{макс} = 5.$$

Порядок оценки профильным экспертным советом ВАК соответствия научного издания требованиям к рецензируемым научным изданиям по заявленной группе научных специальностей/научной специальности предусматривает кластеризацию рецензируемых научных изда-

## ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЕКТЫ

ний в зависимости от полученных оценок по 4 степеням соответствия предъявляемым требованиям (таблица 1).

**Таблица 1**

Шкала оценки степени соответствия

Вербальная оценка степени соответствия	Диапазон критических значений
Высокая	$b_2 \leq \bar{S} < b_{\max}$ ;
Хорошая	$b_{\text{ср}} \leq \bar{S} < b_2$ ;
Удовлетворительная	$b_1 \leq \bar{S} < b_{\text{ср}}$ ;
Низкая	$b_{\min} \leq \bar{S} < b_1$ .

Параметры  $b_1, b_{\text{ср}}, b_2$  определяются по формулам:

$$b_1 = b_{\min} + 0,75(b_{\max} - b_{\min}); \quad (2)$$

$$b_{\text{ср}} = (b_{\min} + b_{\max})/2; \quad (3)$$

$$b_2 = b_{\min} + 0,25(b_{\max} - b_{\min}). \quad (4)$$

В качестве примера работоспособности рассматриваемого порядка получения количественных оценок научных изданий рассмотрим оценку степени соответствия при одинаковой и различной важности степени проявления признаков.

**Исходные данные для оценки степени соответствия при одинаковой важности признаков включают:**

- количество рассматриваемых признаков  $m=2$ ;
- каждый из двух признаков имеет одинаковую важность  $k_1 = k_2 = 1$ ;
- количество экспертов  $n=5$ .

Для определения пороговых значений по формуле 1 определим:

- $b_{\min} = 0,4$  – соответствует случаю полного не проявления всех признаков;

- $b_c = 0,6$  – соответствует случаю слабого проявления всех признаков;

- $b_n = 0,8$  – соответствует случаю неполного проявления всех признаков;

- $b_{\max} = 1,0$  – соответствует случаю полного проявления всех признаков.

По формулам 2-4 определим пороговые значения  $b_1, b_{\text{ср}}, b_2$ :

$$b_1 = 0,55; b_{\text{ср}} = 0,7; b_2 = 0,85.$$

В таблице 2 представлены результаты оценки профильным экспертным советом ВАК степени соответствия рецензируемого научного издания предъявляемым требованиям по заявленной группе научных специальностей/научной специальности при условии одинаковой важности признаков.

Оценка степени проявления конкретного признака произведена путем сравнения средневзвешенного балла данного признака с пороговыми значениями, рассчитанными по формуле 1 для двух признаков соответствия.

Обобщенная оценка соответствия рецензируемого научного издания предъявляемым требованиям по заявленной группе научных специальностей/научной специальности рассчитывается профильным экспертным советом ВАК при условии одинаковой важности признаков и данных таблицы 2.

Результат расчета  $\bar{S} = 0,45$ , что соответствует *низкой степени соответствия*.

**Исходные данные для оценки степени соответствия при различной важности признаков включают:**

- количество рассматриваемых признаков  $m=2$ ;
- каждый из двух имеет одинаковую важность признаков:  $k_1 = 5, k_2 = 3$ ;

**Таблица 2**

Результаты оценки соответствия

№ п/п	Признаки соответствия	Важность признака	Средняя экспертная оценка	Средне-взвешенный балл	Степень проявления признака
1	Научный уровень опубликованных статей	1	0,3	0,3	Низкая
2	Качественный состав редакционной коллегии и/или редакционного совета научного издания.	1	0,6	0,6	Удовлетворительная

**Таблица 3**

Результаты оценки соответствия

№ п/п	Признаки соответствия	Важность признака	Средняя экспертная оценка	Средне-взвешенный балл	Степень проявления признака
1	Научный уровень опубликованных статей	5	0,3	1,5	Низкая (см. таблицу 1)
2	Качественный состав редакционной коллегии и/или редакционного совета научного издания.	3	0,6	1,8	Удовлетворительная (см. таблицу 1)

## ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЕКТЫ

- количество экспертов  $n=5$ .

Для определения пороговых значений по формуле 1 определим:

- $b_{\text{мин}}=3,2$  – соответствует случаю полного не проявления всех признаков;
- $b_c=4,8$  – соответствует случаю слабого проявления всех признаков;
- $b_n=6,4$  – соответствует случаю неполного проявления всех признаков;
- $b_{\text{макс}}=8,0$  – соответствует случаю полного проявления всех признаков.

По формулам 2-4 определим пороговые значения  $b_1, b_{\text{сп}}, b_c$ :

$$b_1 = 4,1; b_{\text{сп}} = 5,6; b_c = 6,7$$

Для оценки степени проявления конкретного признака использовались данные таблицы 2, которые исключают влияние важности признаков на степень их проявления.

Обобщенная оценка соответствия рецензируемого научного издания предъявляемым требованиям по заявленной группе научных специальностей/научной специальности, рассчитывается профильным экспертным советом ВАК при условии различной важности признаков и данных таблицы 3.

Результат расчета  $\bar{S}=3,3$ , что соответствует низкой степени соответствия.

При данных оценках важности признаков обобщенная оценка соответствия рецензируемого научного издания предъявляемым требованиям по заявленной группе научных специальностей/научной специальности аналогична оценке полученной при одинаковой важности признаков (таблица 2).

Вариант другого распределения оценок важности признаков при неизменных балльных оценках экспертов, представлен в таблице 4.

Результат расчета  $\bar{S}=4,2$ , что соответствует удовлетворительной степени соответствия.

Полученные результаты расчетов (таблицы 2-4) подтверждают влияние оценки важности признаков соответствия рецензируемого научного издания предъявляемым требованиям по заявленной группе научных специальностей/научной специальности на общую оценку степени соответствия рецензируемого научного издания предъявляемым требованиям.

Следует отметить, что предлагаемый порядок оценки соответствия рецензируемого научного издания предъявляемым требованиям не ограничивается возможностью рассмотрения только двух признаков (таблицы 2-4), а позволяет учесть экспертные оценки всего спектра признаков, входящих в Требования ВАК, и ранжировать издания по шкале таблицы 1.

### Литература

1. Приказ Минобрнауки России от 12 февраля 2018 г. №99 «О внесении изменений в правила формирования перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, и требования к рецензируемым научным изданиям для включения в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, утвержденные приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 12 декабря 2016 г. №1586».

2. Емелин Н.М. Информационное обеспечение мониторинга рецензируемых научных изданий // Известия Института инженерной физики, 2016. №1(39). С.75-78.

3. Емелин Н.М. Перечень рецензируемых научных изданий: достоинства и недостатки // В сборнике: Современное непрерывное образование и инновационное развитие. 2017. С.183-186.

4. Емелин Н.М., Карулин В.П. Тараброва И.Н. Алгоритм оценивания рецензируемых научных изданий // Сборник научных трудов Института инженерной физики за 2016-2017 гг. // Под редакцией д.тн, проф. А.Н. Царькова и д.тн, проф. И.А. Бугакова. Серпухов: МОУ «ИИФ», 2017. Выпуск 5. Часть 1. С. 75-79.

5. Кириллова О.В., Кузнецов А.Ю., Диментов А.В., Лебедев В.В., Шварцман М.Е. Категории и критерии оценки российских журналов и программы их развития // Научная периодика: проблемы и решения, 2014. Том 4. №5. С.20-34.

6. Котляров И.Д. Принципы оценки качества научных журналов // Образование и наука, 2010. №8.

7. Шкардун В.Д., Ахтямов Т.М. Оценка готовности предприятия к реализации маркетинговой стратегии // Маркетинг, 2001. №3 (58).

Таблица 4

Результаты оценки соответствия

№п/п	Признаки соответствия	Важность признака	Средняя экспертная оценка	Средне-взвешенный балл	Степень проявления признака
1	Научный уровень опубликованных статей	4	0,3	1,2	Низкая (см. таблицу 1)
2	Качественный состав редакционной коллегии и/или редакционного совета научного издания.	5	0,6	3,0	Удовлетворительная (см. таблицу 1)



## AUTHORS

**Ageev Anton V.** Engineer tester of testing laboratory. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udamny I., 1a.

**Ahmedov Temir Kh.** Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udamny I., 1a.

**Ajemov Sergei S.** Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Research Institute of MTUCI. Moscow, Aviamotornaya st., 8a.

**Aksionov Victor E.** Honoured scientist of Russia, Doctor of Technical Sciences, Professor. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Force. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Anfimov Ilya M.** Engineer. National Research Technological University MISiS. Moscow, Leninsky Prospekt, 4.

**Artyushina Larisa A.** Candidate of Pedagogical Sciences. assistant professor. Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovskh. Vladimir, Gorkogo st., 87.

**Atakishchev Aleksandr O.** Graduate student of MTUCI. Moscow, Aviamotornaya st., 8a.

**Atakishchev Oleg I.** Doctor of Technical Sciences, Professor. Deputy general director for special projects. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udamny I., 1a.

**Bukharov Eugeniy O.** Candidate of Technical Sciences. Deputy Head of Research Department. Krasnodar Higher Military School named after General Shtemenko. Krasnodar, Krasina st., 4.

**Bogdanov Maxim B.** Candidate of Technical Sciences, docent, docent of Instruments and biotechnical systems chair of Tula State University. Tula, Lenin Prospekt, 92.

**Drobyshevsky Yuri.V.** Candidate of Chemical Sciences. Director of Development. «Protyus» LLC. Moscow, Zelenograd, Shokin Square, 2, building 4.

**Dunilin Victor M.** Senior Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udamny I., 1a.

**Durnov Artem S.** Researcher. Military unit 33965. Moscow, Michurinsky Prospekt, 70.

**Emelin Nikolay M.** Honored Scientist of the RSFSR, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of FSBSE «Gosmetodcentr». Moscow, Lyusinovskaya st., 51.

**Glazov Dmitry N.** Lecturer. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Force. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Gotman Vladislav G.** Junior researcher of the Institute for High Energy Physics, National Research Center «Kurchatov Institute». Moscow Reg., Protvino, Science Square, 1.

**Griboedova Irina A.** Student. Voronezh state university of engineering technologies. Voronezh, Revolution Av., 19.

**Gribunin Vadim G.** Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation. Doctor of Technical Science. Chief Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udamny I., 1a.

**Ismailova Maria R.** Student, engineer of the Department of Informatics and Information Security. Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovskh. Vladimir, Gorkogo st., 87.

**Karakashev Aleksey V.** Head of department. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udamny I., 1a.

**Karulin Vladimir P.** Honored Worker of Higher School of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor, Senior Researcher of FSBSE «Gosmetodcentr». Moscow, Lyusinovskaya st., 51.

**Klimov Ivan S.** Cadet. S.M. Budjonny Military Academy of the Signal Corps in Saint Petersburg. St. Petersburg, Tikhoretsky Avenue, 3.

**Kobeleva Svetlana P.** Doctor of Technical Sciences. National Research University «Moscow Power Engineering Institute». Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14.

**Kolombet Eugeniy V.** Junior scientist. Head of the laboratory. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

**Kolombet Valeriy A.** Candidate of Physical and Mathematical Sciences. Head of the laboratory. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

**Kostogryzov Andrei I.** Honored Worker of Science of the Russian Federation. Doctor of Technical Sciences, Professor. Director of Research Institute of Applied Mathematics and Certification. Moscow, Vavilova st., 44.

**Kuleshov Vladimir V.** Candidate of Technical Sciences, associate professor, associate professor of Devices and biotechnical systems chair of Tula State University. Tula, Lenin Prospekt, 92.

**Kuchmenko Tat'yana A.** Doctor of Chemical Sciences, Professor, head physical and analytical chemistry department. Voronezh state university of engineering technologies. Voronezh, Revolution Av., 19.

**Lesnykh Vadim N.** Junior scientist. Head of the laboratory. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

**Lobov Igor V.** Candidate for Physical and Mathematical Sciences. Senior researcher of the Institute for High Energy Physics, National Research Center «Kurchatov Institute». Moscow Reg., Protvino, Science Square, 1.



## AUTHORS

**Makalov Alexey O.** Student. Tula State University. Tula, Lenin Prospekt, 92.

**Makov Eugeni O.** Student. Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovskh. Vladimir, Gorkogo st., 87.

**Meshkov Il'ya S.** Postgraduate student, S.M. Budjonny Military Academy of the Signal Corps in Saint Petersburg. St. Petersburg, Tikhoretsky Avenue, 3.

**Monakhov Yuri M.** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Informatics and Information Security. Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovskh. Vladimir, Gorkogo st., 87.

**Nekrasov Sergey A.** Candidate of Technical Sciences, Candidate of Economic Sciences, Senior Researcher. Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences. Moscow, Nakhimovskiy Prospekt, 47.

**Nepeyepiev Andrey G.** Postgraduate student. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Force. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Olenevskaya Ekaterina O.** Researcher of the Department of Strength Studies and Structural Condition Monitoring. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Piskulin Eugeni V.** Candidate of Technical Sciences, associate professor. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Force. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Ponomareva Alina S.** Candidate of physical and mathematical Sciences, senior researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Popov Alexey G.** Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher. Head of the Department of Strength Studies and Technical Diagnostics. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Poryadin Aleksey U.** Candidate of Technical Sciences. Lecturer. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Force. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Poryadina Dar'ya A.** Candidate of Chemical Sciences. Lecturer. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Force. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Prohortov Alexey V.** Candidate of Technical Sciences, Head of the Chair "Devices and Biotechnical Systems". Tula State University. Tula, Lenin Prospekt, 92.

**Ridli Mikhail K.** Graduate student of the Moscow Aviation Institute (National Research University). Moscow, Volokolamskoe highway, 4.

**Ryazancev Alexey M.** Candidate of Technical Sciences, Head of department. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Sal'nikov Denis V.** Candidate of Technical Sciences, associate professor, S.M. Budjonny Military Academy of the Signal Corps in Saint Petersburg. St. Petersburg, Tikhoretsky Avenue, 3.

**Shmyrin Eugeni V.** Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Smirnov Dmitriy V.** Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, associate professor. General director – First Vice-President of Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Smirnov Yaroslav D.** Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Sokolovskiy Eugeni P.** Candidate of Technical Sciences. Head of Research Department. Krasnodar Higher Military School named after General Shtemenko. Krasnodar, Krasina st., 4.

**Starodoubtsev Pavel E.** Head of department. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Stolbov Sergey N.** General manager. «Protyus» LLC. Moscow, Zelenograd, Shokin Square, 2, building 4.

**Varlachev Valery A.** Doctor of Technical Sciences, head of laboratory. National Research Tomsk Polytechnic University. Tomsk, Lenin Avenue, 30.

**Volkov Gennadiy G.** Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor. The Petersburg Nuclear Physics Institute. Leningrad Oblast, Gatchina, Orlova roshcha, 1.

**Volkov Vladimir Z.** Postgraduate student. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Force. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Zelenevskiy Anatoly V.** Candidate of Technical Sciences. Deputy Head of Department. CJSC «Firm of Scientific and Technical Center «KAMI». Moscow, Heroes Panfilovtsev st., 10.

**Zelenevskiy 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.

**Zelenevskiy Yuri V.** Doctor of Technical Sciences, associate professor, researcher. Military Academy of the Strategic Missile Force. Moscow Reg., Balashikha, Karbysheva st., 8.



## ЭТИКА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

Редакционный совет и редакционная коллегия научно-технического журнала «Известия Института инженерной физики» придерживаются принятых международным сообществом принципов публикационной этики, отраженных, в частности, в рекомендациях Комитета по этике научных публикаций (Committee on Publication Ethics).

Все статьи, предоставленные для публикации в журнале «Известия Института инженерной физики», проходят рецензирование на оригинальность, этичность и значимость. Соблюдение стандартов этического поведения важно для всех сторон, принимающих участие в публикации: авторов, редакторов журнала, рецензентов, издателя.

### ОБЯЗАННОСТИ РЕДАКТОРА

Редактор в своей деятельности обязуется:

- постоянно совершенствовать журнал;
- следовать принципу свободы мнений;
- стремиться к удовлетворению потребностей читателей и авторов журнала;
- исключать влияние интересов бизнеса или политики на принятие решений об опубликовании материалов;
- принимать решения на основании принципа справедливости и беспристрастности, обеспечивать прозрачность редакционной деятельности на всех ее этапах;
- не раскрывать информацию о предоставленных материалах никому, кроме соответствующих авторов, рецензентов, других редакционных консультантов;
- оценивать рукописи исключительно по их научному содержанию;
- принимать решение о публикации материалов, руководствуясь следующими главными критериями: соответствие рукописи тематике журнала; актуальность, новизна и научная значимость представленной статьи; ясность изложения; достоверность результатов и законченность выводов. Качество исследования и его актуальность являются основой для решения о публикации;
- принимать меры для обеспечения высокого качества публикуемых материалов и защиты конфиденциальности персональной информации. При обнаружении содержательных, грамматических, стилистических и иных ошибок редакция обязуется предпринимать все меры для их устранения;
- обосновать свое решение в случае принятия или отклонения статьи;
- предоставить автору рецензируемого материала возможность для обоснования своей исследовательской позиции;
- поощрять дискуссии и предоставлять возможность для изложения точки зрения оппонентов;
- не использовать в собственных исследованиях информацию из неопубликованных материалов.

### ОБЯЗАННОСТИ ЧЛЕНОВ РЕДСОВЕТА (РЕДКОЛЛЕГИИ)

**Решение о публикации.**

Редсовет (редколлегия) журнала «Известия Института инженерной физики» являются ответственными за принятие решения о том, какие статьи будут опубликованы в журнале. Решение принимается на основании представляемых на статью рецензий

Редсовет (редколлегия) придерживаются политики журнала и действуют в рамках законных требований, поскольку несут ответственность за нарушение авторских прав.

### Конфиденциальность.

Рецензенты или кто-либо из сотрудников редакции не должны разглашать никакую информацию о предоставленной рукописи кому-либо, кроме самого автора, рецензентов, потенциальных рецензентов, членов редакционного совета (коллегии) и издателя, поскольку она является конфиденциальной.

### Раскрытие информации и конфликт интересов.

Неопубликованные материалы, находящиеся в предоставленной статье, не должны быть использованы в собственном исследовании научного редактора и рецензентов без специального письменного разрешения автора.

### ОБЯЗАННОСТИ РЕЦЕНЗЕНТОВ

Рецензенты оказывают помощь членам редакционного совета (редколлегии) при принятии редакционного решения, а также помогают автору усовершенствовать работу.

### Конфиденциальность.

Любые рукописи, полученные для рецензирования, должны восприниматься как конфиденциальные документы. Они не могут быть показаны либо обговорены с другими лицами, кроме тех, которые уполномочены редакцией.

### Подтверждение источников.

Рецензенты должны идентифицировать опубликованную работу, которая не была процитирована автором. Любое утверждение, что наблюдение, происхождение либо аргумент ранее были сообщены, необходимо сопровождать соответствующей ссылкой. Рецензент должен также донести до сведения редакции о любой существенной схожести или частичном совпадении между рукописью, которая рецензируется, и другой уже опубликованной работой, которая ему знакома.

### Раскрытие информации и конфликт интересов.

Приватная информация или идеи, возникшие в процессе рецензирования, должны остаться конфиденциальными и не могут быть использованы в личных интересах. Рецензент не должен рассматривать рукопись, если имеет место конфликт интересов в результате его конкурентных, партнерских либо других отношений или связей с кем-либо из авторов, компаний или организаций, связанных с материалом публикации.

### ОБЯЗАННОСТИ АВТОРОВ

#### Оригинальность и плагиат.

Авторы должны гарантировать, что они написали полностью оригинальную работу. Если авторы использовали работу и/или слова других авторов, это должно быть соответственно указано и процитировано.

#### Доступ к данным и сохранность.

Автор должен быть готов обеспечить доступ к данным, связанными с материалом публикации, если таковой возможен. Во всяком случае, автор должен быть готов сохранять такие данные на протяжении разумного периода времени после опубликования.

#### Многоразовая, избыточная или конкурирующая публикация.

Автор не должен публиковать работы, которые описывают по сути одно и то же исследование, более чем один раз или более чем в одном журнале.

Предоставление рукописи более чем в один журнал одновременно означает неэтичное издательское поведение и является недопустимым.

#### Подтверждение источников.

Необходимо предоставлять должное подтверждение работ других авторов. Авторы должны процитировать публикации, которые имели значение при создании заявленной работы.

#### Авторство материала.

Авторство необходимо ограничить теми лицами, которые внесли ощутимый вклад в концепцию, проект, исполнение или интерпретацию заявленной работы. Всех, кто внес ощутимый вклад, следует внести в список соавторов.

Автор должен гарантировать, что список авторов содержит только действительных авторов и в него не внесены те, кто не имеет отношения к данной работе, а также то, что все соавторы ознакомились и одобрили окончательную версию статьи и дали согласие на ее публикацию.

#### Раскрытие информации и конфликт интересов.

Все авторы должны сообщать, если в их работе имеется финансовый либо другой конфликт интересов, который может повлиять на результаты или интерпретацию их рукописи.

#### Ошибки в опубликованных работах.

Если автор обнаружит существенную ошибку или неточность в своей опубликованной работе, его обязанность – незамедлительно сообщить об этом в редакцию журнала или издательство и сотрудничать с редакцией при исправлении ошибок.

#### НАРУШЕНИЯ

При возникновении ситуации, связанной с нарушением публикационной этики со стороны редактора, автора или рецензента, требуется ее обязательное рассмотрение. Редакционный совет (редколлегия) обязана потребовать разъяснения, без привлечения лиц, которые могут иметь конфликт интересов с одной из сторон.

Если материал, содержащий значительные неточности, был опубликован, он должен быть незамедлительно исправлен в форме, доступной для читателей и систем индексирования.

## ТРЕБОВАНИЯ К АВТОРАМ СТАТЕЙ

Для публикации принимаются статьи на русском языке. Рекомендуемый объем статьи – 0,2–0,4 п.л. (8000–16000 знаков).

Тексты должны быть представлены:

- в электронном виде (Word 2003). Иллюстративный материал (сложные формулы, рисунки, фотографии и т.д.) кроме размещения в тексте обязательно должны предоставляться отдельными файлами!

- на бумажном носителе формата А4.

Текст статьи должен быть набран через 1,5 интервала (гарнитура «Times New Roman»), кегль 14.

**Простые символы и формулы не набирать в математическом редакторе!**

Напечатанный текст должен иметь поля: верхнее и левое – 2,5 см, правое и нижнее – 2 см.

Вверху первой страницы статьи размещаются:

- рубрика журнала (см. Приложение 1);
- УДК;
- название статьи с переводом на английский язык;
- имя, отчество, фамилия автора (авторов), ученая степень, ученое звание, должность и место работы.

Список литературы (Литература) размещается в конце статьи.

После литературы помещаются:

- список ключевых слов, краткая аннотация (на русском и английском языках).

Завершает рукопись полная информация об авторе (авторах):

- ФИО;
- ученая степень, ученое звание, должность и место работы с переводом на английский язык;

- адрес места работы, контактные телефоны, электронный адрес (по желанию автора – домашний адрес и телефон).

**Обращаем особое внимание на:**

- точность и правильность библиографического оформления списка литературы (в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008);

- выверенность статьи в компьютерном наборе;
- полное соответствие файла на электронном носителе и бумажного варианта.

Редакционная коллегия оставляет за собой право на редактирование статей, при этом с точки зрения научного содержания авторский вариант сохраняется.

Статьи, не принятые к публикации, не возвращаются. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается!

#### Приложение 1

#### РУБРИКАЦИЯ ЖУРНАЛА

«Известия Института инженерной физики»

#### Постоянные рубрики

- **Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы.**
- **Радиотехника и связь.**
- **Информатика, вычислительная техника и управление.**

#### Разовые рубрики

- **Техника специального назначения.**
- **Инновационные проекты.**
- **Техническое регулирование.**
- **Профессиональное образование.**
- **Искусственный интеллект и робототехника.**
- **Медицина и фармацевтика.**
- **Диагностические системы.**
- **Научные обзоры. Научные рецензии. Отзывы.**

В соответствии с Решением Межведомственной комиссии РФ по защите государственной тайны №69 от 26 февраля 2001 г., требованиями законов №5485-1 «О государственной тайне» от 21 июля 1993 г., №149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и защите информации» от 27 июля 2006 г. статьи для публикации принимаются только при наличии экспертного заключения с разрешением на открытое опубликование.



## CONTENTS

### INSTRUMENT MAKING, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES AND SYSTEMS

- Poryadin A.U., Aksionov V.E., Piskulin E.V.**  
Fast-acting complex pre-start calibration of accelerometers with nonlinear optimal estimation of their parameters at a mobile point of decomposition of a system of nonlinear functions ..... 2
- Nepeyiev A.G.**  
Mathematical model of diesel-generator set of combined type ..... 6
- Kuchmenko T.A., Griboedova I.A., Poryadina D.A.**  
Development of express method of microgravimetric determination of actual resins in petrols ..... 11
- Popov A.G., Ageev A.V., Olenevskaya E.O.**  
Methodology for assessing reliability and predicting the residual life of high-pressure vessels of missile weapons facilities to ensure a long-term trouble-free operation according to the current technical state ..... 17
- Anfimov I.M., Varlachev V.A., Drobyshesky Yu.V., Kobeleva S.P., Stolbov S.N., Volkov G.G., Nekrasov S.A., Dunilin V.M.**  
Registration of the effect of selective separation of thermal neutrons: justification, experiments ..... 21
- Bogdanov M.B., Makalov A.O.**  
Calibration of the additive error and non-perpendicularity of the measurement axes of a two-axis magnetometer ..... 27
- Prohortsov A.V.**  
A method for increasing the accuracy of determination of orientation parameters by joint processing of the signals of the BINS and the receiving SNS equipment using a single antenna by signals from three or more navigation satellites ..... 31

### RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATION

- Glazov D.N.**  
Technique of using methods of single-point range-finding in the estimation of their errors ..... 37
- Sal'nikov D.V., Meshkov I.S., Klimov I.S.**  
Forecasting the availability of the global navigation satellite system depending on the varying radar visibility angle of the navigation spacecraft ..... 40
- Zelenevsky V.V., Zelenevsky Yu.V., Zelenevsky A.V., Shmyrin E.V., Durnov A.S.**  
Cascading data encryption with parallel orthogonal internal codes ..... 46
- Atakishchev O.I., Kostogryzov A.I., Ajemov S.S., Atakishchev A.O.**  
Metagrammatic model and decoding method of prefixed coded data ..... 50
- Kuleshov V.V.**  
Algorithm for converting analog information into a digital code in a measuring system ..... 57

### INFORMATION SCIENCE, COMPUTING AND MANAGEMENT

- Lobov I.V., Gotman V.G.**  
Live streaming system over HTTP ..... 60
- Ahmedov T.Kh., Ponomareva A.S.**  
The angle formed by skew acceleration vectors and speeds in the boundary layers of swift-waving wings ..... 67
- Volkov V.Z.**  
Detection of errors in arithmetic and logical devices of specialized computers of information-measuring systems ..... 70
- Monakhov Yu.M., Artyushina L.A., Makov E.O., Ismailova M.R.**  
The model of intellectual dialogue system for automated ticket reservation based on semantic analysis ..... 77
- Gribunin V.G., Ridli M.K., Ryazancev A.M., Smirnov D.V.**  
About the software system of hidden data transmission in JPEG-2000 ..... 82
- Kolombet V.A., Lesnykh V.N., Kolombet E.V.**  
The universal period-tripling system and musical structure ..... 88
- Karakashev A.V., Smirnov Ya.D.**  
Use of a complex information systems is a promising direction of information systems protection from zero-day attacks ..... 91
- Starodoubtsev P.E., Bukharov E.O., Sokolovsky E.P.**  
Management of cryptographic exchange keys stock based on the fuzzy logic algorithm of Sugeno ..... 94

### INNOVATIVE PROJECTS

- Emelin N.M., Karulin V.P.**  
Generalized assessment of compliance of scientific publications with the requirements for peer-reviewed scientific publications ..... 97

### AUTHORS ..... 101

### THE ETHICS OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS ..... 103

### REQUIREMENTS TO AUTHORS ..... 104



**Межрегиональное  
общественное  
учреждение**

**«Институт  
инженерной  
физики»**

**(МОУ «ИИФ»)**

**научное, образовательное  
и производственное  
учреждение**