



# Межрегиональное общественное учреждение "Институт инженерной физики"

(научное, образовательное и производственное учреждение)

#### **B HOMEPE**

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

- **Моисеев К.А.** Физические признаки резонанса механических систем с линейными и нелинейными упругими связями
- **Моисеев К.А.** Оценка влияния осесимметричных и неосесимметричных нагрузок на динамическое поведение круговой цилиндрической оболочки, подкрепленной нерегулярным набором кольцевых шпангоутов
- **17 Дробышевский Ю.В., Дунилин В.М., Волков Г.Г., Столбов С.Н.** Реакторные нейтрино, структура нейтрона и геометрия пространства-времени
- 29 Гордеев Г.А., Попов В.В., Букин А.Г., Пономарёва А.С. Вычислительное моделирование воздействия широкополосной случайной вибрации на модуль электронного устройства при проведении контрольных испытаний аппаратуры
- 33 Букин А.Г., Смирнов Н.В., Пономарёва А.С., Гордеев Г.А., Попов В.В. Вычислительное моделирование тепловыделения модуля электронного устройства при проведении контрольных испытаний аппаратуры РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ
- **37 Коломбет В.А. Лесных В.Н., Коломбет Е.В.** Учет существования сети Пица как новый путь к повышению эффективности распознавания целей
- **40 Батталов С.Т.** Методика построения рациональной организационнотехнической структуры системы оповещения органов управления
- **47 Потапов С.Е.** Методика оптимального управления топологией и трафиком в мультисервисной цифровой сети радиосвязи
- **52 Бочаров А.И., Меша К.И.** Результаты расчетов мощности полезного сигнала и шума на входе приемной антенны РЛС в различных климатических условиях в лесистой местности при различных значениях длин волн
- **54 Меша К.И., Бочаров А.И.** Анализ способов повышения эффективности АСО объектов РВСН
- **56 Реджепов И.В., Токарев Д.А., Вальваков А.М.** Математическое моделирование процедуры автоматической организации соединения (ALE) «точка-точка» в системе декаметровой радиосвязи на базе протокола MIL-STD-188-141B
- **60 Цимбал В.А., Москвин А.А., Довгополая Е.А.** Нахождение вероятностновременных характеристик доставки сообщений в сетях передачи данных с соединениями «точка-многоточка» при различном качестве каналов связи

#### ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

- **70 Корсунский Д.А.** Оценка эффективности обнаружения ошибок на основе кода с минимальной информационной и аппаратурной избыточностью
- **76 Емелин Н.М., Пьянков В.В.** Оценка убывающей функции интенсивности отказов при формировании группировки сложных технических объектов
- **79 Хлебников С.Г., Привалов А.Е.** Методика перехода от IDEF0-диаграмм к детерминированным моделям системной динамики
- **83 Чепик Н.А., Комаров Т.И., Иванов М.А.** Построение абстрактной модели целостности адресного пространства ядра операционной системы

#### ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И РОБОТОТЕХНИКА

**87 Бугаков И.А., Царьков А.Н.** Интеллектуализация военной робототехники: терминологическая и технологическая проблемы

#### ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

- **94 Шугалей Д.В.** Образовательная среда как основа формирования здоровьесберегающей культуры курсантов военных вузов
- **97 Обыночный И.А.** Психолого-педагогические аспекты управленческой деятельности профессорско-преподавательского состава на кафедре вуза
- **101 AUTHORS**
- 103 СОБЫТИЯ
- 104 ТРЕБОВАНИЯ К АВТОРАМ СТАТЕЙ

#### Научно-технический журнал

#### ИЗВЕСТИЯ Института инженерной физики

Nº3(45)2017

Издается с апреля 2006 г. Выходит ежеквартально

Решением Президиума ВАК включен в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий»

Главный редактор, председатель редакционного совета и редакционной коллегии

#### Алексей Николаевич Царьков

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

#### 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

ачальник департамента государственнои корпорации «POCTEX» ОАО КРЭТ 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

#### Николай Михайлович Емелин

заместитель директора ФГБНУ «Госметодцентр» по научной работе заслуженный деятель науки и техники РСФСР доктор технических наук, профессор

#### Валерий Иванович Николаев

научный референт ОАО «Концерн "Созвездие"» доктор технических наук, профессор

#### Владимир Георгиевич Редько

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

#### Юрий Александрович Романенко

заслуженный деятель науки РФ доктор технических наук, профессор

#### Анатолий Васильевич Тодосийчук

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

#### 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 кандидат технических наук, доцент Борис Фёдорович Безродный доктор технических наук, профессор

Сергей Борисович Беркович почетный геодезист РФ доктор технических наук, профессор

**Андрей Борисович Бодунов** выпускающий редактор

Владимир Эрнестович Бородай кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Игорь Александрович Бугаков заслуженный изобретатель РФ, доктор технических наук, профессор

Александр Михайлович Вальваков почетный работник науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор

Вадим Геннадьевич Грибунин доктор технических наук

Сергей Григорьевич Данилюк доктор технических наук, профессор

Владимир Владимирович Зеленевский доктор технических наук, профессор

Николай Николаевич Казаков член Союза писателей России

Олег Павлович Кузнецов кандидат технических наук, доцент

**Александр Ильич Куприянов** доктор технических наук, профессор

**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

Валерий Николаевич Умников доктор технических наук, профессор

Дмитрий Вячеславович Смирнов доктор технических наук, доцент

Сергей Владимирович Смуров доктор технических наук, профессор

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

**Сергей Николаевич Шиманов** почетный радист РФ,

доктор технических наук, профессор ISSN 2073-8110

Учредитель и издатель – MOУ «ИИФ». Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а

Подписной индекс: 59190 по каталогу «Научно-технические издания» ОАО «Роспечать»

Адрес редакции: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а. Тел: +7(4967)35-31-93, 35-13-71 Факс: +7(4967)35-44-20 http://www.iifrf.ru E-mail: info@iifrf.ru

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия. Свидетельство о регистрации СМИ ПИ №ФС77-26650 от 20 декабря 2006 г. Отпечатано на полиграфической базе МОУ «ИИФ».

Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а. Подписано в печать 17.08.2017. Дата выхода в свет 21.08.2017. Тираж 2000 экз. Цена свободная. © Межрегиональное общественное учреждение «Институт инженерной физики» (ИИФ), 2017



#### Владимир Анатольевич Грачёв

Советник Президента Института инженерной физики почетный работник высшего профессионального образования РФ кандидат педагогических наук, полковник запаса

Министерство обороны России ведет огромную плодотворную работу по стимулированию инновационной активности и модернизации предприятий оборонно-промышленного комплекса. Задача государственной важности, поставленная Президентом, добиться максимальной независимости от импортных технологий, комплектующих и технических ресурсов. Военная наука не стоит на месте: разрабатываются перспективные ракетные и робототехнические комплексы, новейшие образцы вооружения, военной и специальной техники, экипировки и специальных средств охраны объектов, многоцелевые летательные аппараты и беспилотные комплексы, технические средства медицинской службы.

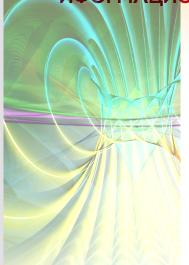
Мощнейшим инструментом интеграции научных разработок в производство продукции военного назначения и взаимодействия между органами власти, промышленными предприятиями и научным организациями являются международные военно-технические форумы и выставки, ведущим и самым масштабным из которых является Международный военно-технический форум «Армия», главным инициатором и организатором которого является МО РФ. В этом году форум «Армия» проводится в третий раз, с 22 по 27 августа, в конгрессно-выставочном центре «Патриот».

Традиционно официальным партнером и активным участником форума «Армия» является МОУ «Институт инженерной физики». По итогам первых двух форумов Институт награжден почетными дипломами в номинации «Системы топогеодезического и навигационного обеспечения» и за разработку автоматизированной информационно-аналитической системы поддержки принятия решений Главного управления научно-исследовательской деятельности МО РФ, а также почетными знаками и дипломами «За вклад в организацию и проведение форума». Четырем руководителям Института вручены награды министра обороны – медали «За достижения в области развития инновационных технологий».

В этом году МОУ «ИИФ» представит на Форуме комплекс высокоточного навигационного оборудования; инновационные охранные системы; тепловизионные мишенные комплексы; медицинские препараты нового поколения; костюмы и эвакуационный термомешок с автономной системой электрообогрева. В начале июня этого года главнокомандующий Военно-морским флотом РФ В.И. Королёв доложил министру обороны РФ С.К. Шойгу о ходе работ по разработке и о готовности принять на снабжение ВМФ РФ костюма электрообогрева водолаза в конце 2017 года, а также эвакуационного термомешка с автономной системой локального обогрева в конце 2018 года. Высокоточное навигационное оборудование, разработанное учеными Института активно применяется для нужд РВСН и ВМФ.

Предстоящее участие МОУ «ИИФ» в Международном военнотехническом форуме «Армия-2017» – важный этап работы в деле продвижения инновационных идей с целью принятия их на вооружение для повышения обороноспособности нашей страны.

Дорогие друзья, желаю вам дальнейших успехов, новых достижений, передовых научных идей и их реализации на благо нашей великой Родины!



УДК 539.371:534.134

# ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ РЕЗОНАНСА МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ЛИНЕЙНЫМИ И НЕЛИНЕЙНЫМИ УПРУГИМИ СВЯЗЯМИ

PHYSICAL SIGNS OF RESONANCE OF THE MECHANICAL SYSTEMS WITH LINEAR AND NONLINEAR RESILIENT CONNECTIONS

#### Константин Александрович Моисеев

кандидат технических наук, доцент

доцент кафедры «Материаловедения и ремонта

вооружения»

филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов) Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, ул.

Бригадная, д. 17 Тел.: 8(962)900-77-29 E-mail: moiseev.1946@bk.ru

#### Аннотация

В статье рассматривается проблема определения физических признаков резонанса как линейных, так и нелинейных систем, которые не опираются на такое базовое понятие динамики как собственная частота, что позволяет применить эти признаки к определению резонансных явлений нелинейных систем. Установлено, что динамическое поведение нелинейных систем качественно отличается от линейных тем, что в них проявляется фазовая нестабильность, характер проявления которой определяет их динамическое поведение. В нелинейных системах резонансных режимов, согласно выявленным физическим признакам, возникнуть не может, а могут возникать только околорезонансные режимы при определенных условиях.

**Ключевые слова:** нелинейные системы, резонанс, фазовая нестабильность, физические признаки резонанса, динамический эффект, резонансный и околорезонансный режимы.

#### Summary

The article considers the problem of determining the physical characteristics of resonance, both linear and nonlinear systems, which do not rely on such a basic concept of dynamics as the characteristic frequency that allows the use of these signs to the definition of resonance phenomena of nonlinear systems. It is established that the dynamic behavior of nonlinear systems is qualitatively different from linear in that they manifest phase instability, the nature of the manifestations which determines their dynamic behavior. In nonlinear systems of resonant modes, according to the identified physical characteristics, can not occur, and can occur only coloradonance modes under certain conditions.

**Keywords:** nonlinear system, resonance, phase instability, physical signs of resonance, dynamic effect, resonance and coloradonance modes.

При решении задач динамики механических систем приходится сталкиваться с системами, которые имеют в своем составе нелинейные упругие связи. Динамическое поведение сложных систем описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений, более простых – одним-двумя дифференциальными уравнениями. Решения для более простых нелинейных уравнений находится, как правило, одним из известных аналитических методов нелинейной механики, для более сложных – численными методами. Закономерности, свойственные механическим системам с нелинейными упругими связями, качественно должны проявляться одинаково, как в сложных, так и простых систе

мах. Поэтому для выявления основных закономерностей, свойственных системам с нелинейными связями, целесообразно использовать самые простые системы, динамическое поведение которых описывается простым по форме дифференциальным уравнением. В нелинейной механике таким уравнением является общеизвестное уравнение Дуффинга:

$$\ddot{x} + 2\alpha \dot{x} + \omega^2 x + \beta x^3 = P \cos vt \,, \tag{1}$$

где  $\alpha = b/2m$  – коэффициент затухания свободных колебаний системы;

 $w^2 = c/m$  – собственная частота порождающей системы, колебания которой описываются уравнением

$$\ddot{x} + 2\alpha \dot{x} + \omega^2 x = P \cos vt ;$$



 $\beta = c_1/m$  – параметр при нелинейном члене уравнения;

m – масса колеблющегося твердого тела;

b – коэффициент диссипации системы;

 $c, c_1$  – коэффициенты жесткости;

 $P = P_0/m$  – приведенная внешняя сила;

v – частота возмущающей силы.

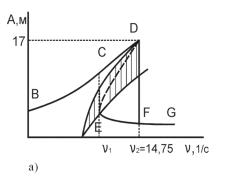
Необходимо отметить, что используемые для решения уравнения Дуффинга различные аналитические методы основываются на одинаковом представлении авторов этих методов о динамическом поведении нелинейных систем [1, 2, 3]. Такое представление заключается в том, что при гармонической нагрузке на систему ее отклик представляет собой сумму гармоник, приоритет среди которых имеет первая гармоника, поэтому задача любого аналитического метода нелинейной механики найти соответствующие коэффициенты при гармониках и, по-возможности, их зависимость от частоты внешнего воздействия, т.е. получить их ампли-

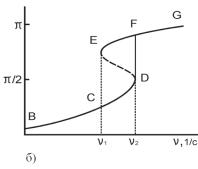
тудно-частотные характеристики. Все имеющиеся аналитические методы позволяют получить практически одинаковое решение только в первом приближении, остальные приближения уточняют результаты первого приближения решения.

Одной из важнейших проблем нелинейной механики является проблема по определению резонансных частот нелинейных систем. Так как к нелинейным системам в отличие

от линейных неприменимо такое понятие как собственные частоты, которые при резонансе совпадают с частотой внешней нагрузки, то возникает вопрос, как же определять резонансные частоты, если их не с чем сопоставлять. Поиск периодических решений нелинейных уравнений в виде ряда Фурье неизбежно привел к мысли, что, если одна из составляющих гармоник будет близка или совпадать с частотой внешнего возбуждения v, т.е. nw = v, где w – собственная частота порождающей системы, а n – целые положительные числа, то наступит резонанс n-го рода или колебания будут вблизи этого резонанса. В последующем в работе [1] была предложена классификация резонансов, которая помимо основного резонанса, когда  $w \approx v$ , учитывала и резонансы на обертонах собственной и внешней частоты. Однако результаты решений конкретных практических задач показали, что резонансов на указанных частотах не происходит и частотные диапазоны, включающие в себя указан-

ные выше частоты, вообще нельзя отнести к разряду резонансных [3]. А поскольку для нелинейных систем не было физических признаков, по которым можно было бы судить о наличии резонансов в системе, то за резонансные частотные области предложено было принято считать те, у которых самая большая амплитуда [4]. Этот вообще-то ненаучный подход говорит о том, что теория нелинейных колебаний по сравнению с теорией линейных колебаний далека от своего завершения, и вопрос о наличии каких-либо резонансов в нелинейных системах требует скорейшего своего разрешения, так как он является отправной точкой для понимания физических законов динамики нелинейных систем. В работе [3] на основе анализа резонансной кривой и фазочастотной характеристики (рисунок 1) предлагается вообще отказаться от понятия резонанса, не давая этому удобному и широко распространенному понятию строгого определения, а говорить лишь о некоторой резонансной области.





**Рис. 1.** Резонансная кривая (а) и фазочастотная характеристика (б), построенные на основе решения уравнения Дуффинга аналитическими методами при наличии в системе затухания при  $\omega^2$  =1;  $\beta$  =1;  $\alpha$  = 0,1; P = 50

Из сказанного выше вытекают две взаимосвязанные между собой проблемы: первая проблема – выявление в динамическом поведении нелинейных систем таких закономерностей, которые позволили объяснить несоответствие результатов решений, полученных численными и аналитическими методами; вторая проблема – необходимо найти такие физические признаки резонанса, которые бы были одинаково применимы, как к линейным, так и к нелинейным системам и которые бы не опирались на такое понятие, как собственная частота.

Поиск таких признаков резонанса показал, что они как раз и позволяют выявить основные закономерности, которые присущи всем нелинейным системам. Физические признаки резонанса сначала определим на примере линейного уравнения

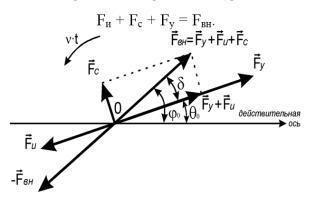
$$\ddot{x} + 2\alpha \dot{x} + \omega^2 x = P \sin(\nu t + \varphi_0).$$



Для этого рассмотрим изменения фазовых отношений между силовыми компонентами системы:

- упругих сил  $F_{v} = cx$ , где c коэффициент жесткости;
- сил инерции  $F_u = m \cdot d^2x/dt^2$ , где m коэффициент инерции (масса), которые находятся в противофазе с силами упругости;
- сил сопротивления  $F_c=b\cdot dx/dt$ , где b коэффициент диссипации, которые смещены относительно упругих сил на угол n/2, и внешней силы  $F_{gn}=P\sin(vt+\varphi_0)$ .

При дорезонансных режимах колебаний векторная диаграмма сил с учетом замечаний, сделанных ранее, будет такой, как показана на *рисунке* 2, где силовое равенство определяется уравнением



**Рис. 2.** Распределение сил в линейной системе с одной степенью свободы при учете сил сопротивления, при нерезонансном режиме колебаний

Для более удобного анализа механизма возбуждения колебаний в системе уравнение

$$\ddot{x} + 2\alpha \dot{x} + \omega^2 x = P \sin(vt + \varphi_0)$$

можно представить в виде системы двух уравнений (рисунок 2):

$$\begin{cases} \vec{F}_{\dot{e}} + \vec{F}_{\dot{o}} = \vec{F}_{1\dot{a}\dot{i}}; \\ \vec{F}_{\dot{a}\dot{i}} = \vec{F}_{2} \end{cases} , \tag{2}$$

где  $F_{1eh} = F_{eh} \cos \delta(v)$ ;

 $F_{2eH} = F_{eH} \sin \delta(v);$ 

 $\delta(v) = \varphi_0 - \theta_0(v)$  – сдвиг фаз между внешней силой и силой упругости;

 $\theta_0(v)$  – сдвиг фазы силы упругости в начальный момент времени при конкретном значении частоты v внешней силы.

Первое уравнение системы (2) позволяет установить, какая часть амплитуды колебаний зависит от нагрузки  $F_{1вн}$ , определяющей упругие перемещения системы и силы инерции. Второе уравнение системы (2) характеризует динамический эффект от внешней силы, так как сила  $F_{2вн}$  будет действовать в фазе со скоростью системы, осуществляя, таким образом, дополнительный прирост к амплитуде колебаний от нагрузки  $F_{1вн}$ .

Назовем ту часть внешней динамической нагрузки, которая определяется проекцией вектора внешней силы на направление вектора упругих сил системы и которая вызывает чисто упругие ее колебания, упругой частью внешней силы. Часть внешней динамической силы, которая определяется проекцией вектора внешней силы на направление вектора скорости системы и которая вызывает чисто динамические ее колебания, назовем динамической частью внешней силы. Тогда можно ввести такое новое понятие, как динамический эффект, под которым нужно понимать способность колебательной системы реагировать на динамическую часть внешней силы.

Заметим, что угол  $\delta$  для каждой определенной частоты внешней силы будет постоянным, но при изменении частоты внешней силы от нуля до резонансной w угол  $\delta$  изменяется от нуля до n/2, т.е. угол  $\delta$  является функцией частоты внешней силы. В квазистатическом диапазоне частот внешней силы, когда v << w, приоритет будет иметь упругая часть внешней силы  $F_{1\mu\mu}$ , т.е. энергия внешней силы будет затрачиваться в основном на возбуждение упругих перемещений системы, а влиянием динамической части внешней силы можно пренебречь, поэтому сама система будет вести себя как система без сил сопротивления. При увеличении частоты внешнего воздействия обе составляющие, и упругая часть внешней силы  $F_{1 в \mu}$ , и динамическая часть внешней силы  $F_{2вн}$ , будут влиять на величину амплитуды колебаний системы, а энергия внешней силы будет затрачиваться не только на преодоление упругих сил системы, но и на преодоление силы сопротивления. При частоте внешней силы, соответствующей околорезонансному режиму, часть амплитуды колебаний от упругой части внешней силы  $F_{\mathit{1вн}}$  будет незначительна, поэтому основная величина амплитуды колебаний будет определяться динамической частью внешней силы, т.е. силой  $F_{2 {\it e} {\it H}}.$  Таким образом, можно констатировать, что при приближении к резонансу динамический эффект в системе будет увеличиваться.

При резонансном режиме колебаний будут иметь место строгие равенства:  $F_{2вn} = F_{вn}$  и  $F_{1вn} = 0$ , т.е. система уравнений (2) будет выглядеть таким образом:

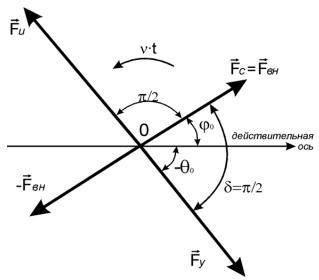
$$\begin{cases} \vec{F}_{\dot{e}} + \vec{F}_{\dot{o}} = 0; \\ \vec{F}_{\dot{a}\dot{i}} = \vec{F} \end{cases} . \tag{3}$$

Система уравнений (3) формально состоит из двух независимых уравнений и соответствует диаграмме сил при резонансе, представленной на *рисунке 3*.



Внешняя сила будет полностью совпадать по фазе с вектором скорости движения системы, вызывая близкие к максимальному значению отклонения системы от точки равновесия, а энергия внешней силы будет направлена исключительно на преодоление только силы сопротивления.

Очевидно, что динамический эффект при резонансе будет максимальным.



**Рис. 3.** Распределение сил в линейной системе с одной степенью свободы при учете сил сопротивления при резонансном режиме колебаний

Сама же система, согласно первому уравнению системы (3), будет колебаться, как свободная консервативная (без трения) система, с собственной частотой колебаний  $\omega$  и амплитудой, которая бы могла определяться начальным отклонением, равным значению резонансной амплитуды. Очевидно, что полная энергия такой системы является постоянной величиной [5, 6], т.е. E=T+U=const.

Используя полученные результаты и новое понятие о динамическом эффекте, можно дать новое определение резонанса: резонансом можно назвать колебательный процесс, при котором динамический эффект достигает своего максимального значения. Физическими признаками резонанса можно считать:

- 1. Попарное равенство сил:  $F_{y} = F_{u}, F_{c} = F_{en};$
- 2. Постоянство полной энергии системы E=T+U=const, где  $T=0.5m(dx/dt)^2$  кинетическая энергия системы;  $U=0.5cx^2$  потенциальная энергия системы.

Если учесть, что перемещение системы описывается выражением  $x=Asin(vt+\delta)$ , то амплитуда силы сопротивления  $F_c$  будет иметь выражение bvA. Тогда, согласно сказанному выше, при резонансе должно иметь место равенство амплитуд силы сопротивления и внешней силы P,

т.е.  $b \omega A_{pe3} = P$ , откуда  $A_{pe3} = P/b \omega$ . Учитывая, что b = 2ma, где a – коэффициент затухания свободных колебаний системы, приходим к такому выражению для резонансной амплитуды  $A_{pe3} = P/2ma\omega$ , которое совпадает с тем, что обычно приводится в научно-технической литературе [5, 6].

Заметим, что выявленное свойство системы не опирается явно на такое базовое понятие теории линейных колебаний, как собственная частота w.

Описанные выше процессы можно доказать и с энергетической точки зрения. Если применить к уравнению Лагранжа, на основе которого получено дифференциальное уравнение динамического поведения линейной системы [6]

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial T}{\partial q} = -\frac{\partial U}{\partial q} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}} + Q_F(t)$$

общеизвестные преобразования Эйлера [5, 6], можно получить следующее равенство:

$$\frac{d(T+U)}{dt} = -2\hat{O} + Q_F(t)\dot{x}, \qquad (4)$$

где  $\Phi = 0.5b(dx/dt)^2$  – диссипативная функция Релея;

 $Q_{F}(t)$  – внешняя обобщенная сила.

Из равенства (4) следует, что изменение полной энергии во времени возмущенной системы зависит от соотношения между силой сопротивления, определяемой функцией рассеяния  $\Phi$  и внешней силой  $Q_F(t)$ .

Подставляя выражение для перемещений  $x(t) = A sin(vt + \varphi)$  в выражения для кинетической и потенциальной энергий и складывая их, получим

$$E = T + U = \frac{1}{4} mA^2 \left( \left( v^2 + \omega^2 \right) + \left( \omega^2 - v^2 \right) \cos 2(vt + \varphi) \right). (5)$$

Таким образом, полная энергия системы состоит из постоянной составляющей и переменной, изменяющейся с двойной частотой 2v. В этом случае экстремум функции E(t) = T(t) + U(t) может быть определен из известного условия dE/dt = d(T+U)/dt = 0.

Тогда

$$\frac{dE}{dt} = \frac{d(T+U)}{dt} = -\frac{1}{2}mA^{2}v(\omega^{2} - v^{2})\sin 2(vt + \varphi) = 0. (6)$$

Равенство (6) может быть выполнено при любом t только при условии равенства собственной частоты w системы частоте v внешнего возмущения, т.е. при w=v, которое и является общеизвестным условием возникновения резонансного режима для линейной системы с одной степенью свободы. Только в этом случае полная энергия системы будет иметь постоянное значение

$$E = T + U = 0.5 \text{mA} 2\omega 2 = const. \tag{7}$$



Таким образом, с энергетической точки зрения основным признаком проявления резонанса в линейной системе с одной степенью свободы является равенство d(T+U)/dt=0 или аналогичное ему E(t)=T(t)+U(t)=const, причем оно полностью соответствует общепринятому условию  $\omega=v$ , при котором появляется резонанс в такой системе. Постоянство полной энергии при резонансе рассматриваемой системы говорит о том, что ее движение описывается уравнением свободных колебаний  $md^2x/dt^2+cx=0$  или в форме сил

$$F_u + F_y = 0.$$

В то же время условие d(T+U)/dt=0 автоматически приводит к равенству  $Q_F(t)(dx/dt)=2\Phi$ . Последнее означает, что изменение энергии в системе в результате ее рассеивания полностью компенсируется изменением энергии внешнего источника.

При резонансе силы сопротивления для системы с одной степенью свободы при гармоническом воздействии можно выразить таким образом

$$b(dx/dt) = \omega bA \cos(vt - 0.5n) = \omega bA \sin vt$$
,

т.е. силы сопротивления действуют в противофазе с внешней силой, так как  $F_c - F_{вн} = 0$ . Отсюда следует, что при резонансе амплитуда внешней силы должна быть равна амплитуде сил сопротивления, т.е. wbApes=P или Apes=P/bw, что соответствует выводам, которые сделаны выше на основе попарного равенства сил. Приведенные результаты свидетельствуют, что система ведет себя как свободная консервативная система с начальным отклонением от положения равновесия, равным величине резонансной амплитуды.

При решении практических задач по определению резонансных режимов более удобно использовать энергетический признак резонанса, если в какой-либо форме удается получить выражение для полной энергии системы.

Выявленные два дополнительных признака резонанса для линейных систем с одной степенью свободы получены на основе уравнения Лагранжа второго рода, которое справедливо и для нелинейных систем. Поэтому следует ожидать, что попарное равенство сил и постоянство полной энергии должно иметь место и при резонансе нелинейных систем, потому что при других условиях, т.е. при других фазовых углах между силовыми компонентами системы, резонансные явления возникнуть просто не могут.

Рассмотрим особенности проявления резонансных режимов в самой простой нелинейной системе с одной степенью свободы, колебательные процессы которых описываются уравнением Дуффинга [3, 4].

Напомним, что результаты решений уравнения Дуффинга важны с той точки зрения, что они наиболее полно раскрывают существенные стороны динамического поведения нелинейных систем, так как многие более сложные системы имеют в своем составе нелинейные связи, которые чаще всего описываются нечетными полиномами третьего порядка [3].

Согласно приведенным выше выкладкам, уравнение Дуффинга можно записать по аналогии с системой уравнений (2), которая в раскрытом виде будет выглядеть таким образом:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + c_0 x + c_1 x^3 = F_{1\acute{a}\acute{a}}; \\ b\dot{x} = F_{2\acute{a}\acute{a}}. \end{cases} \tag{8}$$

В общем виде получить какое-либо достаточно точное аналитическое решение для системы уравнений (8) достаточно сложно [3, 4], что делает затруднительным анализ его решений на всем представляющем практический интерес частотном диапазоне изменения внешней силы. Однако при резонансном режиме, когда должно иметь место попарное равновесие сил, такое исследование упрощается.

При резонансе систему уравнений (8) с учетом попарного равновесия сил можно записать таким образом:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + c_0 x + c_1 x^3 = 0; \\ b\dot{x} = P\cos vt. \end{cases}$$
 (9)

Можно попытаться найти решение, взяв за основу второе уравнение, тогда при нулевых начальных условиях движения системы

$$x = \frac{P}{b} \int \cos v t dt = \frac{P}{bv} \sin vt.$$

Если это значение подставить в первое уравнение системы (9), то никакого равенства не будет, т.е.

$$m(d^2x/dt^2) + c_0x + c_1x^3 \neq 0.$$

Поэтому за основу следует взять решение первого уравнения, которое свидетельствует о постоянстве энергии при колебаниях.

Первое уравнение после общепринятых преобразований можно представить в таком виде

$$d^{2}x/dt^{2} + \omega^{2}x + \beta x^{3} = 0, \tag{10}$$

где  $w^2 = c_0/m$  – собственная частота порождающей системы, когда  $\beta = 0$ ;

 $\beta = c_1/m$  – коэффициент, определяющий степень нелинейности упругой характеристики.

Уравнение (10) представляет собой уравнение нелинейного осциллятора, решением которого может быть или эллиптический косинус  $cn(\Omega t, k)$ , или эллиптический синус  $sn(\Omega t, k)$ , где k – модуль



эллиптической функции, а  $\Omega$  – резонансная частота системы, которая отлична от собственной частоты порождающей системы. При k=0, а, следовательно, и  $\beta=0$ , эллиптические функции вырождаются в тригонометрические, а  $\Omega=\omega$ . Ниже приведены некоторые соотношения для эллиптических косинуса и синуса, которые использовались для дальнейших исследований [7]:

$$d(cn(\Omega t,k)/dt = -\Omega sn(\Omega t,k)dn(\Omega t,k);$$
  
$$d(sn(\Omega t,k)/dt = \Omega cn(\Omega t,k)dn(\Omega t,k),$$

где  $dn(\Omega t, k)$  – функция дельта амплитуды.

Анализ приведенных выше соотношений показывает, что главное отличие эллиптических функций от соответствующих тригонометрических состоит в том, что их производные представляют собой произведение двух функций. Причем период функции дельта амплитуды  $dn(\Omega t,k)$  в два раза меньше периода эллиптических косинуса и синуса, следовательно, не будет постоянного фазового рассогласования между эллиптическим синусом и косинусом и их производными, как у тригонометрических функций. Воспользуемся приведенными выше соотношениями и возьмем в качестве решения уравнения (10) эллиптический косинус  $x = A_{be3} cn(\Omega(t$  $t_0$ ),k), в виду того, что в правой части уравнения Дуффинга стоит тригонометрический косинус, то вторую производную от x по t можно представить таким образом:

$$d^{2}x/dt^{2} = -\Omega^{2}A_{pes}cn(\Omega(t-t_{0}),k) (1 - 2k^{2} + 2k^{2}cn^{2}(\Omega(t-t_{0}),k)).$$

Тогда выражения для силы инерции

$$F_{\nu}(t) = m(d^2x/dt^2)$$

и для силы упругости

$$\begin{split} F_y(t) &= c_0 x + c_1 x^3 = Apes \ cn(\Omega(t-t_0),k)(c1 + c^2 A^2_{pes} \cdot cn^2(\Omega(t-t_0),k)) \end{split}$$

идентичны и отличаются только постоянными величинами. Чтобы соблюдалось равновесие сил, должны выполняться равенства

$$m\Omega^{2}(1-2k^{2})=c_{1}$$
 w  $2m\Omega^{2}k^{2}=c_{2}A^{2}_{pes}.$ 

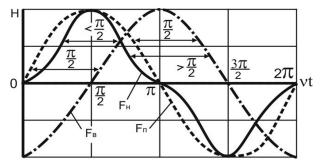
При этом вектор упругой силы и вектор силы инерции, будучи равны по своей абсолютной величине, и направлены в противоположные стороны, вращаются с одинаковой частотой  $\Omega$ , но на основное их движение накладывается дополнительное, определяемое соответствующими членами:

$$2k^2\ cn^2(\Omega(t-t_0),k)$$
 и  $c_2\ A^2_{pes}\ cn^2(\Omega(t-t_0),k)$ .

Причем дополнительное движение векторов сил инерции и упругости возникает на каждом полупериоде колебаний и согласовано так, что-

бы соблюдалось равновесие сил. Таким образом, вектор силы инерции и вектор силы упругости помимо основного вращения с частотой внешней силы  $v=\Omega$  периодически совершают дополнительное колебание около некоторого среднего своего положения, отклоняясь от него на некоторый угол  $\psi$  с угловой скоростью  $d\psi/dt$ . Под средним положением следует понимать такое положение векторов сил упругости и инерции, при котором фазовые углы между ними и вектором внешней силы составляют п/2. Такое дополнительное колебание векторов сил упругости и инерции около среднего положения можно назвать фазовой нестабильностью колебательного процесса. А так как дополнительный колебательный процесс носит периодический характер, то такую фазовую нестабильность можно назвать периодической фазовой нестабильностью. Очевидно, что фазовая нестабильность инерционных и упругих силовых компонентов, хотя и не нарушает силового равновесия всей системы, но изменяет фазовые сдвиги между ними, которые свойственны резонансному режиму и которые могут соблюдаться только в отдельные моменты времени, когда все векторы сил одновременно будут проходить свое среднее положение, и фазовые углы между ними будут равны n/2. Отсюда следует вывод, что вращение векторов сил упругости и инерции не будет равномерным, как при фазостабильном вращении, а изменение этих сил во времени будет носить не гармонический, а периодический характер. На *рисунке 4* представлены графики упругих сил нелинейной системы, имеющих периодический характер, и порождающей, имеющей гармонический характер, а также график гармонической внешней силы, которые в наглядной форме демонстрируют изменение фазовых сдвигов между внутренними периодическими силами нелинейной системы и гармонической внешней силой.

Графики строились при таких значениях коэффициентов уравнения Дуффинга, какие



**Рис. 4.** Разность фаз между упругой силой нелинейной системы  $\mathsf{F}_n$ , упругой силой порождающей системы  $\mathsf{F}_n$  и между гармонической внешней силой  $\mathsf{F}_a$ 

использовались в работе [3]: m=1;  $c_0=1$ ;  $c_1=1$ ; b=0,2; P=50.

Анализ изменения сил на рисунке 4 ясно показывает, что в первой половине полупериода колебаний фазовый сдвиг между силой упругости нелинейной системы  $F_{\mu}$  и внешней гармонической силой Fн будет меньше n/2, а во второй половине полупериода больше п/2. Для порождающей системы аналогичные фазовые сдвиги между силовыми компонентами будут составлять n/2, т.е. в такой системе будет иметь место резонанс. В нелинейной системе фазовые сдвиги на основном отрезке времени полупериода колебаний уже не будут соответствовать резонансному режиму, а соответствовать они будут только в отдельные моменты времени, когда vt = 0, n, 2n, ... Последнее означает, что именно в эти моменты времени динамический эффект будет достигать своего максимального значения, а затем уменьшаться. Вы-

явленная закономерность (фазовая нестабильность) динамического поведения нелинейных систем является важнейшим их свойством.

Подводя итог проведенным исследованиям, дадим определение фазовой нестабильности: под фазовой нестабильностью будем понимать свойство динамических систем, характеризуемое тем, что фазовые сдвиги между силовыми компонентами системы изменяются во времени.

На основе приведенных соображений можно сделать вывод, что рассогласование фаз δ между вектором

внешней силы и силы упругости будет зависеть не только от частоты изменения внешней силы v, но и от угловой скорости  $d\psi/dt$  фазовой нестабильности, т.е. фазовый сдвиг  $\delta$  будет являться функцией не только параметра v, но и от величины  $d\psi/dt$ .

При этом заметим, что синхронное колебание векторов сил инерции и упругости не изменяет полной энергии системы, а оставляет ее постоянной

$$E = T + U = 0.5m\Omega^2 A_{pes}^2 = const.$$

В этом можно убедиться, если подставить выражение для перемещений х и ее первой производной в выражения для кинетической и потенциальной энергии системы.

На рисунке 5 приведены графики изменения потенциальной, кинетической и полной энергий нелинейной дуффинговской системы. Вычисления проводились при значениях коэффициентов уравнения, которые использовались в работе [3].

Следует отметить отличия между графиками энергий линейной и нелинейной систем. В

линейной (фазостабильной) системе кинетическая и потенциальная энергии равномерно распределены относительно периода колебаний, а в нелинейной (фазонестабильной) системе – неравномерно. Такая неравномерность распределения энергии за период колебаний является одним из признаков проявления периодической фазовой нестабильности системы.

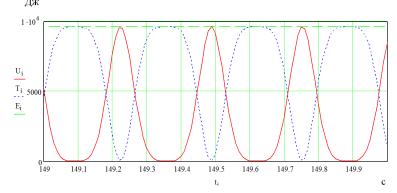
Теперь исследуем, будет ли иметь место равновесие между силой трения и внешней силой, т.е. будет ли выполняться равенство

$$b(dx/dt) = P \cos vt$$
.

Используя приведенные выше соотношения для эллиптических косинуса и синуса, можно записать это равенство в таком виде:

$$-b\Omega A_{be3}sn(\Omega(t-t_0),k)(1-k^2sn^2(\Omega(t-t_0),k))^{0.5} = Pcosvt.$$
 (11)

Анализ выражения (11) показывает, что даже при равенстве амплитуд сил, т.е. когда ампли-



**Рис. 5.** Изменение потенциальной, кинетической и полной энергий нелинейной системы при резонансе

туда внешней силы равна амплитуде силы сопротивления  $P = b\Omega A_{pes}$ , равенства между левой и правой частью в выражении из-за фазовой нестабильности соблюдаться не будет.

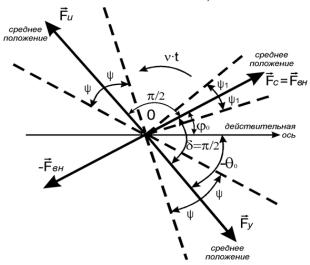
Поэтому, хотя общее равновесие сил системы может и соблюдаться, но будут постоянно нарушаться фазовые сдвиги, которые свойственны резонансному режиму, и соответствовать они резонансу могут только тогда, когда сила сопротивления и силы инерции и упругости будут проходить через среднее положение, тогда динамический эффект будет проявляться максимальным образом. При отходе от среднего положения каких-либо сил динамический эффект будет уменьшаться, и попарного равновесия сил соблюдаться уже не будет.

Дополнительное колебание вектора силы сопротивления около своего среднего положения также приводит к изменению фазового угла  $\delta$ .

Из сказанного выше следует, что при воздействии гармонической силы на нелинейную систему сила сопротивления будет носить пери-



одический, а не гармонический характер (рисунок 6), т.е. полного совпадения сил, как при резонансе линейной системы, не будет.



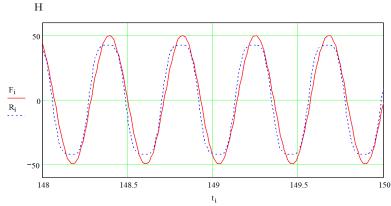
**Рис. 6.** Распределение сил в нелинейной системе с одной степенью свободы при учете сил сопротивления, при околорезонансном режиме колебаний

Отметим, что согласно результатам численного решения уравнения Дуффинга, представленного на *рисупке* 7, силы сопротивления будут иметь не только некоторые фазовые рассогласования с внешней силой, но и отличаться от нее по амплитуде колебаний.

Из этого следует, что резонансный режим нелинейной системы, который описывается уравнением Дуффинга, в реальности возникнуть не может, так равенства амплитуд сил сопротивления и внешней силы во втором уравнении системы не будет.

Таким образом, результаты решения, полученные численным методом, подтверждают сделанные выше аналитические выкладки.

Следует обратить внимание на то, что речь идет об одной резонансной частоте, а не о серии



**Рис. 7.** Изменение внешней гармонической силы  $F_i$  и силы сопротивления  $R_i$  нелинейной системы во времени

резонансных частот, которые якобы присущи нелинейным системам [1, 2, 4, 8].

Ограниченность объема статьи не позволяет показать все многообразие динамического поведения исследуемых систем. Отметим только основные их закономерности динамического поведения.

Исследование резонансных кривых, построенных на основе решений уравнения Дуффинга численными методами, показывает, что в зонах неоднозначности решений реализуется всегда решение с большей амплитудой колебаний. Это можно также показать на примере первого приближения решения уравнения Дуффинга, полученного одним из аналитических методов нелинейной механики. Например, для первого приближения решения уравнения Дуффинга методом Бубнова-Галеркина получаем амплитудночастотное и фазочастотное уравнения [3]:

$$\left[ \left( \omega^2 + \frac{3}{4} \beta A^2 - v^2 \right)^2 + 4\alpha^2 v^2 \right] A^2 = P^2; \quad (12)$$

$$\varphi = arctg \frac{2\alpha v}{\omega^2 + \frac{3}{4}\beta A^2 - v^2}.$$
 (13)

Амплитудно-частотное уравнение (12) приводит или к бикубическому уравнению относительно амплитуды колебаний A, или к биквадратному уравнению относительно частоты внешней силы  $\nu$ . Биквадратное уравнение относительно частоты  $\nu$  позволяет в наглядной аналитической форме представить формулу зависимости частоты  $\nu$  от коэффициентов уравнения Дуффинга [3]:

$$v = \sqrt{\omega^2 + \frac{3}{4}\beta A^2 - 2\alpha^2 \pm \sqrt{\frac{P^2}{A^2} + 4\alpha^4 - 4\alpha^2 \left(\omega^2 + \frac{3}{4}\beta A^2\right)}}. (14)$$

Именно выражение (14) используют для построения резонансной кривой нелинейной системы (рисунок 1), динамическое поведение которой описывается уравнением Дуффинга. Очевидно, что по выражению (14), используя существующие представления о резонансных частотах, весьма проблематично найти резонансную частоту и соответствующую ей амплитуду колебаний. Это всегда ставило в тупик специалистов по нелинейной механике [3]. Однако это можно сделать, если амплитудно-частотное уравнение представить в такой форме [4]:



$$A = \frac{P}{\sqrt{\left(\omega^2 + \frac{3}{4}\beta A^2 - v^2\right)^2 + 4\alpha^2 v^2}} = \frac{P}{\sqrt{\left(\omega(A)^2 - v^2\right)^2 + 4\alpha^2 v^2}}.(15)$$

Если учесть, что максимальное значение амплитуды гармонических колебаний нелинейной системы А постоянно для каждого значения частоты внешнего воздействия v, то величина  $w(A) = (w^2 + 0.75\beta A^2)^{0.5}$  будет также постоянна. Если величину w(A) считать аналогом собственной частотой нелинейной, а точнее линеаризованной, системы, то ее динамическое поведение будет отличаться от динамического поведения порождающей (линейной) системы тем, что каждому значению частоты v будет соответствовать своя «собственная» частота системы, а само приближенное уравнение можно записать в традиционной форме:

$$d2x/dt2 + 2adx/dt + \omega(A)2x = Pcosvt.$$
 (16)

В этом случае можно использовать общепринятое определение резонанса, согласно которому резонанс системы будет проявляться при условии, когда

$$v = \omega(A) = (\omega^2 + 0.75\beta A^2)^{0.5}$$
.

Тогда резонансную амплитуду можно определить из выражения

$$A_{pes} = P/2\alpha(\omega^2 + 0.75\beta A^2)^{0.5},$$

которое после элементарных преобразований приводится к биквадратному уравнению

$$A^{4}_{pes}\!+\!pA^{2}_{pes}\!+\!q\!=\!0,$$

где  $p = 4\omega^2/3\beta$ ;  $q = P^2/3\alpha^2\beta$ .

Решая это уравнение, находим выражение для определения величины резонансной амплитуды

$$A_{\rm pes} = \pm \; (-\; 0.5 p \; + \; (0.25 p^2 - q)^{0.5})^{0.5},$$
а затем и резонансной частоты

$$\Omega_{\rm pes} = (\omega^2 + 0.75 \beta A_{pes}^2)^{0.5}.$$

Тогда построение амплитудно-частотной характеристики линеаризованной системы, колебательные процессы которой описываются уравнением (16), будет подчиняться тем же правилам, что и построение АЧХ линейной системы. Но в этом случае зоны неоднозначности у АЧХ линеаризованной системы не будет, причем ее не может быть в принципе, так как при достижении резонансной частоты v=w(A) линеаризованная система будет воспринимать от внешнего источника максимум энергии, что соответствует максимальному значению амплитуды колебаний. При малейшем увеличении частоты внешней силы больше резонансной произойдет

срыв амплитуды колебаний на нижнюю ветвь резонансной кривой. При медленном уменьшении частоты внешнего воздействия от значения, соответствующего точке G на резонансной кривой (рисунок 1), до резонансной частоты, амплитуда колебаний в системе скачком достигнет своего максимального значения, т.е. станет равна резонансной, и при последующем уменьшении частоты будет изменяться согласно резонансной кривой на участке DCB. Таким образом, режим колебаний, соответствующий нижней ветви в зоне неоднозначности FE, физически реализован быть не может.

Поэтому резонансная кривая нелинейной системы, когда ее движение аппроксимируется одной гармоникой, не может иметь зоны неоднозначности. Этот вывод имеет два следствия: вопервых, он позволяет объяснить тот факт, почему ни при проведении практических и вычислительных экспериментов никто еще зоны неоднозначности не получил; во-вторых, существующие методы определения устойчивости решений не дают полной картины поведения исследуемой системы, причем коррекцию необходимо вносить и в ФЧХ системы, когда она будет изменяться по линии DF, т.е. также не будет иметь зоны неоднозначности.

Вывод о том, что приближенная АЧХ нелинейной системы не имеет зоны неоднозначности, позволяет сделать весьма важное утверждение: нелинейная система, будучи поставлена перед необходимостью «выбора» режима колебаний (в зоне неоднозначности решений, бифуркации решений и их ветвлении), всегда «выбирает» тот режим, который обеспечивает наибольший среди всех остальных динамический эффект. Это предположение распространяется и на системы, у которых упругие силы описываются более сложной зависимостью, чем та, что представлена в уравнении Дуффинга. Этот вывод подтверждается дальнейшими исследованиями и позволяет существенно сократить аналитические и численные исследования нелинейной системы по определению зон неустойчивости динамических процессов.

При приведенных значениях коэффициентов уравнения Дуффинга значения резонансной амплитуды и частоты, вычисленных по вышеприведенным формулам, имеют следующие величины:  $A_{pes} \approx 17$ ;  $\Omega_{pes} \approx 14,75$ . Наиболее близкие значения амплитуды и частоты, вычисленные по результатам решения уравнения Дуффинга численным методом Рунге-Кутта при ненулевых начальных условиях x(0) = 50; dx(0)/dt = 0 (рисунок 4), имеют такие значения  $A \approx 17,27$ ;  $\Omega \approx 14,65$ . В остальных точках этой АЧХ, как и при других началь-



ных условиях движения системы, значения АЧХ построенные численными методами в разы отличаются от АЧХ, построенной аналитическими методами по одной гармонике.

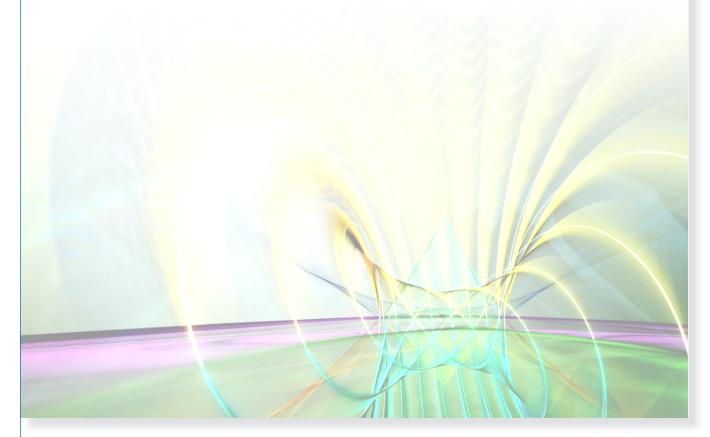
В качестве основного вывода сделанного по материалам статьи можно сказать, что работе приведена часть понятийного аппарата, которая включает в себя новые термины и понятия: о динамической и упругой частях внешней силы, о динамическом эффекте, о фазовой нестабильности нелинейных систем, о периоде фазовой нестабильности, о фазостабильных и фазонестабильных системах, об околорезонансном режиме. На основе приведенных понятий дано новое определение резонанса и приведены физические признаки его проявления.

Из приведенного материала так же можно сделать выводы: динамическое поведение нелинейных систем качественно отличается от линейных тем, что в них проявляется фазовая нестабильность, характер проявления которой определяет их динамическое поведение; в нелинейных системах резонансных режимов в строгом их понимании возникнуть не может, а могут возникать только околорезонансные режимы при определенных условиях; решения, полученные аналитическими методами нелинейной механики, существенно отличаются от решений, полученных численными методами, тем, что используют тригонометрические функции,

которые могут описать только фазостабильный колебательный процесс. Поэтому удовлетворительное совпадение решений возможно только при тех условиях, когда фазовая нестабильность нелинейных систем будет проявляться незначительно, например, в околорезонансном режиме.

#### Литература

- 1. Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. Т.3. М.: Наука, 2005. 605 с.
- 2. Боголюбов Н.Н., Крылов Н.М. Нелинейная механика. Т.4. М.: Наука, 2006. 432 с.
- 3. Крюков Б. И. Вынужденные колебания существенно нелинейных систем. М.: Машиностроение, 1984. 216 с.
- 4. Вибрации в технике. Справочник. М.: Машиностроение, 1979. Т.2. 352 с.
- 5. Бабаков И.М. Теория колебаний. М.: Наука, 1968. 560 с.
- 6. Яблонский А.А., Норейко С.С. Курс теории колебаний. М.: Лань, 2003. 256 с.
- 7. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1973. 832 с.
- 8. Гребеников Е.А., Митропольский Ю.А. Метод усреднения в исследованиях резонансных систем. М.: Наука. Главная редакция физ.-мат. литературы, 1992. 224 с.



No3(45)2017





УДК 539.371:534.134

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ И
НЕОСЕСИММЕТРИЧНЫХ НАГРУЗОК НА ДИНАМИЧЕСКОЕ
ПОВЕДЕНИЕ КРУГОВОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ,
ПОДКРЕПЛЕННОЙ НЕРЕГУЛЯРНЫМ НАБОРОМ
КОЛЬЦЕВЫХ ШПАНГОУТОВ

EVALUATION OF THE EFFECT OF AXISYMMETRIC AND NON AXISYMMETRIC LOADS ON THE DYNAMIC BEHAVIOR OF A CIRCULAR CYLINDRICAL SHELL SUPPORTED ON IRREGULAR A SET OF RING FRAMES

#### Константин Александрович Моисеев

кандидат технических наук, доцент

доцент кафедры «Материаловедения и ремонта вооружения» филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)

Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17

Тел.: 8(962)900-77-29 E-mail: moiseev.1946@bk.ru

#### Аннотация

Задача динамического расчета некоторых элементов ракетной техники лежит в основе вибродиагностики технического состояния конструкции. Причем одной из важнейших проблем динамических расчетов является возможность получить достоверные результаты уже на начальных этапах проектирования сложных систем. Для этого необходимо принимать научно обоснованные допущения, которые и позволяют получить необходимые результаты. С целью структурного упрощения расчетной схемы предлагается использовать энергетический критерий оценки взаимного влияния упругих связей составляющих элементарных подсистем, а также операторный и комбинационный методы.

**Ключевые слова:** круговая цилиндрическая оболочка, комбинационный метод, операторный метод, метод вариации постоянных, осесимметричная и неосесимметричная нагрузка, коэффициент динамичности.

#### Summary

The task of dynamic calculation of some elements of missile technology is the basis of the vibration diagnostics of the technical condition of the structure. And one of the major challenges of dynamic analysis is the ability to obtain reliable results at the early stages of complex systems design. You must adopt a scientifically sound assumptions, which allow to obtain the required results. With the goal of structural simplification of the design scheme it is proposed to use the energy criterion of mutual influence of elastic couplings components of elementary subsystems, and operator and combining methods.

**Keywords:** circular cylindrical shell, matching method, operator method, method of variation of constants, axisymmetric and non-axisymmetric load, the dynamic factor.

Анизотропная, многослойная круговая цилиндрическая оболочка, подкрепленная нерегулярным набором кольцевых шпангоутов в процессе эксплуатации подвергается влиянию подвижных распределенных и сосредоточенных нагрузок, динамическое поведение ее определяется следующей системой дифференциальных уравнений в частных производных [1, 2]:

$$\begin{cases} L_{11}(C, \Delta)u + L_{12}(C, K, \Delta, \Lambda)v + L_{13}(C, K, \Delta, \Lambda)w = -r^{2}(k_{mp}F_{\text{RuB}} \cdot \delta(\xi - \xi(t)) + k_{1mp}F_{p\omega\theta}(t)), \\ L_{21}(C, K, \Delta, \Lambda)u + L_{22}(C, K, \Delta, \Lambda)v + L_{23}(C, K, \Delta, \Lambda)w = -r^{2} \cdot \delta(\xi - \xi_{1}) + k_{1mp}F_{p\omega\theta}(t), \\ \sum_{i=1}^{s} \sum_{n=1}^{\infty} \beta_{\kappa n} \sin n\theta \left(\sum_{m=1}^{\infty} \sin \lambda_{m}\xi_{i}\phi_{2mn}(t) - \delta(\xi - \xi_{1})\xi_{\kappa n}(t)\right), \\ L_{31}(C, K, \Delta, \Lambda)u + L_{32}(C, K, \Delta, \Lambda)v + L_{33}(C, K, D, \Delta, \Lambda, \Theta)w = r^{2} \cdot \left(\pi rat^{2}P_{\sum} + P_{\sum} \delta(\xi - \xi(t)) + F_{p\omega\theta}(t)\right) - \end{cases}$$

$$(1)$$

$$\begin{split} &\left\{-\sum_{i=1}^{s}\sum_{n=1}^{\infty}\beta_{pn}\cos n\theta\left(\sum_{m=1}^{\infty}\sin \lambda\xi_{i}\phi_{3mm}(t)-\delta(\xi-\xi_{i})\zeta_{pm}(t)\right),\right.\\ &\left.\left.\left.\sum_{i=1}^{s}\sum_{n=1}^{\infty}\sin n\theta\left(\ddot{\zeta}_{sn}^{i}+2\alpha_{s}\dot{\zeta}_{sn}^{i}+(\omega_{sn}^{2}+\beta_{sn})\zeta_{sn}^{i}-\beta_{sn}\sum_{m=1}^{\infty}\sin \lambda_{m}\xi_{i}\phi_{2mn}(t)\right)=0,\right.\right.\\ &\left.\left.\left.\sum_{i=1}^{s}\sum_{n=1}^{\infty}\cos n\theta\left(\ddot{\zeta}_{pn}^{i}+2\alpha_{p}\dot{\zeta}_{pn}^{i}+(\omega_{pn}^{2}+\beta_{pn})\zeta_{pn}^{i}-\beta_{pn}\sum_{m=1}^{\infty}\sin \lambda_{m}\xi_{i}\phi_{3mn}(t)\right)=0,\right.\right. \end{split}$$

где  $L_{ij}$  (i,j=1,2,3) – дифференциальные операторы, зависящие от коэффициентов жесткости C, K и диссипации  $\Delta$ ,  $\Lambda$ ;

 $\zeta^i_{\ \kappa n},\ \zeta^i_{\ pn}$  – круговые и радиальные перемещения i-го кольцевого шпангоута, прикрепленного к цилиндрической оболочке в известной продольной координате;

$$F_{\rho\alpha\delta}(t) = c \left( \delta \left( \xi - \xi_{0i} + 0.5at^2 \right) \delta \left( \theta - 0 \right) w_p^i(t) \right) - \delta \left( \xi - 0.5at^2 \right) \delta \left( \theta - \pi \right) w_p^{KK}(t) \right).$$



Математическая модель исследуемой системы оказывается достаточно сложной и представляет собой систему дифференциальных уравнений в частных производных, которую надо решать совместно с алгебраическими условиями связей. Общий порядок этой системы достаточно высок, что практическое решение задачи даже при использовании современной вычислительной техники вызывает большие трудности.

Эти трудности могут быть преодолены путем рационального структурного упрощения составной упругой системы еще на стадии разработки расчетной схемы. Смысл такого упрощения заключается в том, что при производстве расчета частот собственных колебаний достаточно ограничиться лишь той частью спектра, которая лежит в диапазоне частот внешних эксплуатационных нагрузок, действующих на соответствующих режимах работы системы.

Структурное упрощение может быть выполнено с помощью энергетического критерия, приведенного в работе [3], и дающего возможность оценки вклада каждой из подсистем для рассматриваемого диапазона частот возбуждения в энергию колебаний системы в целом.

Упрощение составной системы производится путем последовательного сравнения энергетического вклада подсистем с номерами i и i+1 с помощью неравенств, которые для связи, распределенной в координатном диапазоне b, имеют вид

$$\frac{\sum\limits_{\mathbf{n}+\mathbf{l}}^{\infty}\int\limits_{b}\int\limits_{b}^{\omega}\frac{\varphi_{i+\mathbf{l},n}(r)\varphi_{i+\mathbf{l}}(z)R(s,r)R(s,z)drdz}{v^{2}-\omega_{i+\mathbf{l},n}^{2}}}{\sum\limits_{m+\mathbf{l}}^{\infty}\frac{\varphi_{i,m}(s)\varphi_{i,m}(s)}{v^{2}-\omega_{i,m}^{2}}}<<1;$$

$$\sum_{n+1}^{\infty} \int_{b} \frac{\varphi_{i+1,n}(r)\varphi_{i+1}(z)R(s,r)R(s,z)drdz}{\varphi_{i,m}^{2}(s)} << 1.$$

3десь  $\varphi_{i+1,n}, \varphi_{i,m}$  – собственные функции i-й и i+1 подсистем с номерами m и n;

 $R\left( s,r\right) -$  распределенная по координате  $\varepsilon$  в диапазоне b реакция связи подсистем от действия на i-ю подсистему в точке s гармонической силы с частотой  $v,_{wi+1,n}, w_{i,m}$  – частоты собственных колебаний i-й и i+1-й подсистем.

Для точечного соединения подсистем выражение энергетического критерия существенно упрощается и имеет вид

$$\frac{\left| \frac{\sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{v^2 - \omega_{i,m}^2}}{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{v^2 - \omega_{i+1,n}^2}} \right| << 1.$$
 (2)

Физический смысла выражения (2) состоит в том, что при постоянной частоте внешнего возмущения величина числителя и знаменателя выражения (2) зависят от величин собственных частот подсистем, если собственная частота i–ой подсистемы юі,т будет ближе по величине к частоте внешней гармонической силы v, по сравнению с собственной частотой i+1-й подсистемы  $w_{i+1,n}$ , то влиянием на динамическое поведение всей системы i+1-й подсистемы можно пренебречь. По сути дела, зная пределы изменения частоты внешней гармонической силы, можно вместо соотношения (2) использовать сравнение собственных частот каждой из подсистем, и брать во внимание влияние на динамическое поведение всей системы только той подсистемы, у которой собственные частоты по величине окажутся ближе к частоте внешней нагрузки.

Для определения собственных частот цилиндрической оболочки воспользуемся операторным методом [4], который позволяет построить характеристическое уравнение для неподкрепленной цилиндрической оболочки

$$p^{6} + a_{5mn}p^{5} + a_{4mn}p^{4} + a_{3mn}p^{3} + a_{2mn}p^{2} + a_{1mn}p + a_{0mn} = 0$$

где коэффициенты  $a_{jmn} = b_{jmn}/b_{6mn}$ ,  $(j=1,2,\ldots 5)$  определяются из раскрытия определителя

$$\begin{split} D = & L_{11}L_{22}L_{33} + L_{12}L_{23}L_{31} + L_{13}L_{21}L_{32} - L_{13}L_{22}L_{31} - \\ & - L_{12}L_{21}L_{33} - L_{11}L_{23}L_{32}, \end{split}$$

причем символы дифференцирования включаются в операторы  $L_{ij}$  (i,j=1,2,3) как обыкновенные постоянные величины.

Для вычисления корней характеристического уравнения используются самые элементарные программы, например, в программной среде Mathcad. Так как коэффициенты при нечетных степенях характеристического уравнения более чем на порядок меньше коэффициентов при четных степенях, то они будут попарно комплексно-сопряженными, т.е.

$$p_{1,2mn} = -\alpha_{1mn} \pm \omega_{1mn}; \ p_{3,4mn} = -\alpha_{2mn} \pm \omega_{2mn}; \ p_{5,6mn} = -\alpha_{3mn} \pm \omega_{3mn}$$

где  $a_{imn}$  – коэффициенты затухания свободных колебаний оболочки;

 $w_{imn}$  – частоты свободных колебаний оболочки.

Собственные частоты вычисляются по известной формуле:

$$\Omega_{jmn}=(\omega_{jmn}^2+\alpha_{jmn}^2)^{0,5}.$$

Собственные частоты кольцевых шпангоутов определим из выражений



$$\omega_{pn}^{2} = \frac{G_{1}J_{u}g}{S_{u}\gamma_{u}r_{u}^{4}} \frac{n^{2}(1-n^{2})^{2}}{(1+n^{2})},$$

$$\omega_{\kappa n}^{2} = \frac{E_{2}J_{u}g}{S_{u}\gamma_{u}r_{u}^{4}} \frac{n^{2}(1-n^{2})^{2}}{(1+n^{2})}.$$

Вычисления проведены при тех исходных данных, которые используются в ракетной технике. Анализ результатов показал, что собственные частоты цилиндрической трехслойной оболочки более чем на порядок меньше собственных частот кольцевых шпангоутов. Этот вывод говорит о том, что динамическим эффектом кольцевых шпангоутов можно пренебречь и считать их абсолютно твердыми телами. Тогда систему дифференциальных уравнений (1) можно упростить и записать ее таким образом:

$$\begin{cases} L_{11}(C,\Delta)u + L_{12}(C,K,\Delta,\Lambda)v + L_{13}(C,K,\Delta,\Lambda)w = -r^2k_{mp}F_{\rho\omega\theta}(t)), \\ L_{21}(C,K,\Delta,\Lambda)u + L_{22}(C,K,\Delta,\Lambda)v + L_{23}(C,K,\Delta,\Lambda)w = -r^2 \times \\ \times \sum_{i=1}^{s} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \beta_{sn}\delta(\xi - \xi_i)\sin n\theta\phi_{2mn}(t), \\ L_{31}(C,K,\Delta,\Lambda)u + L_{32}(C,K,\Delta,\Lambda)v + L_{33}(C,K,D,\Delta,\Lambda,\Theta)w = r^2 \times \\ \times \left( \pi r a t^2 P_{\sum} + P_{\sum} \delta(\xi - \xi(t)) + F_{\rho\omega\theta}(t) \right) - \sum_{i=1}^{s} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \beta_{pn}\delta(\xi - \xi_i)\cos n\theta\phi_{3mn}(t). \end{cases}$$

Используя ортогональность тригонометрических функций, можно привести систему уравнений (3) к такому виду:

$$\begin{cases} L_{11mn}\varphi_{1mn}(t) + L_{12mn}\varphi_{2mn}(t) + L_{13mn}\varphi_{3mn}(t) = -r^2X_{mn}(t), \\ L_{21mn}\varphi_{1mn}(t) + \overline{L}_{22mn}\varphi_{2mn}(t) + L_{23mn}\varphi_{3mn}(t) = 0, \\ L_{31mn}\varphi_{1mn}(t) + L_{32mn}\varphi_{2mn}(t) + \overline{L}_{33mn}\varphi_{3mn}(t) = r^2Z_{mn}(t), \end{cases}$$

$$\Gamma \mathcal{A}e \ \overline{L}_{22mn} = L_{22mn} + \sum_{i=1}^{s} \beta_{sn} \sin \lambda_m \xi_i,$$

$$\overline{L}_{33mn} = L_{33mn} + \sum_{i=1}^{s} \beta_{pn} \sin \lambda_m \xi_i,$$

$$X_{mn}(t) = c \Big( \cos \Big( \xi_{0i} + 0.5at^2 \Big) w_p^i(t) - \cos 0.5at^2 w_p^{KK}(t) \Big);$$

$$Z_{mn}(t) = \pi r a t^2 P_{\Sigma} + P_{\Sigma} \sin 0.5 \lambda_m a t^2 + X_{mn}(t).$$

Анализ уравнений системы (4) показывает, что кольцевые шпангоуты своим подкрепляющим эффектом увеличивают собственные частоты круговой цилиндрической оболочки.

Проведем оценку влияния осесимметричных подвижных нагрузок на динамическое поведение круговой цилиндрической оболочки. Для этого воспользуемся комбинационным методом, который представляет собой органическое сочетание операторного метода и метода вариации постоянных. При осесимметричном нагружении система уравнений (4) упростится и ее можно записать таким образом:

$$\begin{aligned} & L_{11}(C, \Delta)u + L_{13}(C, K, \Delta, \Lambda)w = 0, \\ & L_{31}(C, K, \Delta, \Lambda)u + L_{33}(C, K, D, \Delta, \Lambda, \Theta)w = r^2\pi rat^2 P_{\sum} \left(1 + \delta(\xi - \xi(t))\right) - \\ & - \sum_{i=1}^{s} \sum_{m=1}^{\infty} \beta_{pm} \delta(\xi - \xi_i) \varphi_{3m}(t). \end{aligned} \tag{5}$$

Неизвестные продольные и и радиальные w перемещения цилиндрической оболочки можно представить в таком виде:

$$u(\xi,t) = \sum_{m=1}^{\infty} \varphi_{1m} \cos m\lambda \xi,$$

$$w(\xi,t) = \sum_{m=1}^{\infty} \varphi_{3m} \sin m\lambda \xi ,$$

где  $\lambda = n/L$ ;

L – длина оболочки;

m – число полуволн по длине оболочки;

 $\varphi_{jm}\left(t
ight)$  – неизвестные функции времени, подлежащие определению (j=1,3);

 $cos(m\lambda\xi)$ ,  $sin(m\lambda\xi)$  – собственные функции, описывающие формы колебаний вдоль продольной координаты цилиндрической оболочки.

Согласно операторному методу [4] неизвестные функции  $\varphi_{jm}(t)$  можно определить через новые функции времени (потенциальные функции)  $\psi_{jm}(t)$  таким образом:

$$\varphi_{1m}(t) = D_{11} \psi_{1m}(t) + D_{12} \psi_{3m}(t);$$

$$\varphi_{2m}(t) = D_{21} \psi_{1m}(t) + D_{22} \psi_{3m}(t),$$
(6)

где  $D_{ij}$  – миноры определителя D, составленного из коэффициентов системы уравнений (5). Тогда система уравнений приводится к двум независимым уравнениям [4]:

$$D\psi_{1m}(t) = 0$$
;  $D\psi_{3m}(t) = r^2 P_{\sum} \sin 0.5 \lambda_m a t^2$ , (7)

где B – дифференциальный оператор, полученный раскрытием определителя:

$$D = \begin{vmatrix} L_{11m} & L_{13m} \\ L_{31m}; & \overline{L}_{33m}; \end{vmatrix} = L_{11m} \overline{L}_{33m} - L_{13m} L_{31m}. (8)$$

Первое уравнение из (7) независимо от последнего и определяет свободные колебания цилиндрической оболочки в продольном направлении. При принятом предположении о нулевых значениях начальных условий движения оболочки его можно не рассматривать. Тогда выражения (7) упростятся и их можно записать таким образом:

$$\psi_{1m}(t) = D_{12}\psi_{3m}(t);$$

$$\psi_{3m}(t) = D_{22}\psi_{3m}(t).$$

Уравнение  $\varphi_{3m}(t) = D_{22} \varphi_{3m}(t)$  представляет собой дифференциальное уравнение от одной пе-



ременной t, которое в раскрытом виде можно записать таким образом:

$$b_{4m} \frac{d^4 \psi_{3m}(t)}{dt^4} + b_{3m} \frac{d^3 \psi_{3m}(t)}{dt^3} + b_{2m} \frac{d^2 \psi_{3m}(t)}{dt^2} + b_{1m} \frac{d \psi_{3m}(t)}{dt} + b_{0m} \psi_{3m}(t) = P_{\sum} \sin \lambda_m \xi(t).$$
(9)

Коэффициенты  $b_m$  определяются параметрами цилиндрической оболочки.

Определив комплексно-сопряженные корни характеристического уравнения

$$p^{4} + \frac{b_{3m}}{b_{4m}} p^{3} + \frac{b_{2m}}{b_{4m}} p^{2} + \frac{b_{1m}}{b_{4m}} p + \frac{b_{0m}}{b_{4m}} = 0, (10)$$

соответствующего уравнению (9), можно записать общее решение однородного дифференциального уравнения:

$$\psi_{0m}(t) = e^{-\alpha_{1m}t} \left( C_{1m} \cos \omega_{1m}t + C_{2m} \sin \omega_{1m}t \right) + e^{-\alpha_{2m}t} \left( C_{3m} \cos \omega_{2m}t + C_{2m} \sin \omega_{1m}t \right)$$
(11)

где постоянные  $C_{1m}...C_{4m}$  определяются из начальных условий движения исследуемой системы.

На основе общего решения однородного уравнения (9) запишем полное решение этого уравнения согласно идеологии метода вариации постоянных

$$\psi_{3m}(t) = e^{-\alpha_{1m}t} \left( C_{1m}(t) \cos \omega_{1m} t + C_{2m}(t) \sin \omega_{1m} t \right) + e^{-\alpha_{2m}t} \left( C_{3m}(t) \cos \omega_{2m} t + C_{2m}(t) \sin \omega_{1m} t \right)$$
(12)

где неизвестные функции времени  $C_{1m}(t)...C_{4m}(t)$  определяются из условий, представленных в работе [5].

Решая эту систему уравнений относительно неизвестных функций  $dC_{1m}(t)/dt...dC_{4m}(t)/dt$  с последующим их интегрированием, получим выражения для функций  $C_{1m}(t)...C_{4m}(t)$ , подставляя которые в выражение (12), находим неизвестные функции  $\psi_{3m}(t)$ :

$$\psi_{3m}(t) = \psi_{0m}(t) + P_{\sum_{m=0}^{t}} \int_{0}^{t} K_{m}(t-\tau) \sin \lambda_{m} \xi(\tau) d\tau,$$
 (13)

где 
$$K_m(t-\tau) = -\left\{T_{1m}e^{-\alpha_{1m}(t-\tau)}\left(a_{1m}\sin\omega_{1m}(t-\tau) + a_{2m}\cos\omega_{1m}(t-\tau)\right) + a_{2m}\cos\omega_{1m}(t-\tau)\right\}$$

$$+T_{2m}e^{-\alpha_{2m}(t-\tau)}\left(a_{5m}\sin\omega_{2m}(t-\tau)+a_{6m}\cos\omega_{2m}(t-\tau)\right)\right\}.$$

При принятых нулевых начальных условиях выражение (13) упростится

$$\psi_{3m}(t) = P_{\sum_{n=0}^{t} K_m(t-\tau) \sin \lambda_m \xi(\tau) d\tau \cdot (14)}$$

Чтобы более наглядно провести оценку динамических характеристик корпуса ТПК, сделаем некоторые упрощения: рассмотрим вместо равноускоренного движения, когда  $\xi(t)=0.5at2$ , равномерное движение, когда

$$\xi(t) = 0.5at2 = v_{cp}t.$$

Тогда частное решение (14) можно получить в аналитическом виде. Варьируя параметр  $v_{cp}$ , можно определить поведение корпуса ТПК в любой его координате. Обозначая через  $\Omega_m = \lambda_m \, v_{cp}$ , после вычисления интеграла (14), получим:

$$\psi_{3m}(t) = G_{1m}\cos\Omega_m t + G_{2m}\sin\Omega_m t = A_m\cos(\Omega_m t - \theta_m), (15)$$

где амплитудно-частотные характеристики  $G_{1m}$  и  $G_{2m}$  записаны в традиционной форме, удобной для анализа динамических характеристик цилиндрической оболочки.

Исследуем изменение коэффициента динамичности корпуса ТПК. Для этого составим отношение динамического значения амплитуды к статическому, когда  $\Omega_m = 0$ :

$$k_o = \frac{A_m}{A_{mc}} = \frac{\frac{\left(a_{1m} - a_{2m}\right)T_{1m}P_{\sum}}{\sqrt{\left(\omega_{1m}^2 - \Omega_m^2\right)^2 + 4\alpha_{1m}^2\Omega_m^2}} + \frac{\left(a_{5m} - a_{6m}\right)T_{2m}P_{\sum}}{\sqrt{\left(\omega_{2m}^2 - \Omega_m^2\right)^2 + 4\alpha_{2m}^2\Omega_m^2}} = \frac{\left(a_{1m} - a_{2m}\right)T_{1m}P_{\sum}}{\omega_{1m}^2} + \frac{\left(a_{5m} - a_{6m}\right)T_{2m}P_{\sum}}{\omega_{2m}^2} = \frac{\left(a_{5m} - a_{6m}\right)T_{2m}P_{\sum}}{\omega_{2m}^2}$$

$$= \frac{\frac{A_{1mc}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\Omega_{m}^{2}}{\omega_{1m}^{2}}\right)^{2} + \frac{4\alpha_{1m}^{2}\Omega_{m}^{2}}{\omega_{1m}^{4}}} + \frac{A_{2mc}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\Omega_{m}^{2}}{\omega_{2m}^{2}}\right)^{2} + \frac{4\alpha_{2m}^{2}\Omega_{m}^{2}}{\omega_{2m}^{4}}}}, (16)}$$

$$= \frac{A_{1mc}}{A_{1mc} + A_{2mc}}$$

где 
$$A_{1mc} = \frac{\left(a_{1m} - a_{2m}\right)T_{1m}P_{\sum}}{\omega_{1m}^2};$$

$$A_{2mc} = rac{\left(a_{5m} - a_{6m}
ight)T_{2m}P_{\sum}}{\omega_{2m}^2} - \mathop{\mathrm{амплитуды}}_{\mathrm{ских}} \ \mathop{\mathrm{статиче-}}_{\mathrm{ских}}$$
 корпуса ТПК.

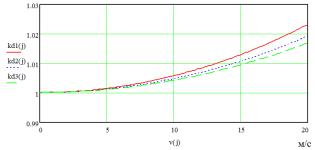


Рис. 1. Изменение коэффициента динамичности по первым трем формам движения корпуса ТПК при максимальной скорости движения подвижной нагрузки

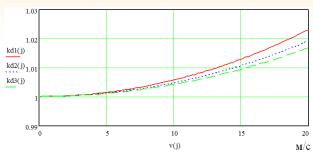


Рис. 2. Изменение коэффициента динамичности по первым трем формам движения корпуса ТПК при минимальной скорости движения подвижной нагрузки

Анализ коэффициентов динамичности, соответствующих первым трем формам движения подкрепленной цилиндрической оболочки, показывает, что с увеличением величины собственных частот оболочки коэффициент динамичности убывает, поэтому расчеты можно проводить только для первой формы движения оболочки.

Величина максимального значения коэффициента динамичности при максимальной нагрузке не превышает 1,025, следовательно, динамический эффект от подвижного фронта движения подвижной нагрузки практически не проявляется.

Таким образом, в результате исследований установлено, что влиянием на динамику корпуса ТПК подвижного фронта давления при подводном минометном старте можно пренебречь, так как его динамический эффект практически не выходит за рамки статического нагружения.

Аналогичные результаты получаются при исследовании влияния на динамическое поведение круговой цилиндрической оболочки неосесимметричной нагрузки. Исследования коэффициента динамичности показали, что он по своей

величине не превосходит тех значений, которые были приведены на *рисунках 1* и 2. Эти результаты свидетельствуют о том, что динамическим эффектом от неосесимметричной нагрузки можно также пренебречь, что позволяет упростить исходную расчетную схему и использовать ее уже на начальных этапах проектирования сложных систем.

В качестве вывода можно сказать, что в работе представлена методика оценки динамических характеристик круговой анизотропной цилиндрической оболочки, основу которой представляет разработанный автором комбинационный метод. На основе представленного комбинационного метода можно исследовать динамические характеристики различных систем при различных по своим физическим свойствам нагрузках, что позволяет зачастую упростить исходную расчетную схему разрабатываемой системы и исследовать ее динамическое поведение уже на начальных этапах проектирования.

#### Литература

- 1. Амбарцумян С.А. Общая теория анизотропных оболочек. М.: Наука, 1974. 448 с.
- 2. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. М.: Издательство иностранной литературы, 1987. 444 с.
- 3. Умушкин Б.П. Колебания составных упругих систем // Научный Вестник МГТУ ГА, серия Эксплуатация воздушного транспорта, 2006. № 109.
- 4. Гольденвейзер А.Л. Теория упругих тонких оболочек. М.: Наука, 1976. 512 с.
- 5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука,  $1973.~832~\mathrm{c.}~\mathrm{c}~\mathrm{u.}$



УДК 621.01

### РЕАКТОРНЫЕ НЕЙТРИНО, СТРУКТУРА НЕЙТРОНА И ГЕОМЕТРИЯ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ

**REACTOR NEUTRINOES, STRUCTURE** OF A NEUTRON AND GEOMETRY **OF SPACE TIME** 

#### Юрий Васильевич Дробышевский

кандидат химических наук

заместитель директора по науке

ООО «Протиус» Адрес: 124460, Москва, г. Зеленоград,

пл. Шокина, д. 2, стр. 4 Тел.: +7(903)724-08-22 E-mail: drbshevski@mail.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, м-н 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

Tел.: +7(4967)12-80-04E-mail: upitd@iifmail.ru

#### Сергей Николаевич Столбов

генеральный директор ООО «Протиус»

Адрес: 124460, Москва, г. Зеленоград,

пл. Шокина, д. 2, стр. 4 Тел.: +7(906)042-95-89 E-mail: stolbovsn@mail.ru

#### Аннотация

В статье показано, что возможно создание эффективного инструмента, который позволяет получить управляемые пучки реакторных нейтронов и нейтрино.

Ключевые слова: нейтроны, нейтрино, поляризация потоков нейтронов, кинематика распада, управляемые пучки, волновые свойства антинейтрино.

#### Summary

In article it is shown that creation of the effective tool which allows to receive the operated bunches of reactor neutrons and a neutrino is possible.

**Keywords:** neutrons, a neutrino, polarization of streams of neutrons, disintegration kinematics, the operated bunches, wave properties of an antineutrino.

#### Введение

В настоящее время ядерные реакторы позволяют с одной стороны интенсивно использовать их как для поисков ответов на ряд важнейших вопросов, касающихся новых внутренних свойств нейтрона, так, с другой стороны для изучения волновых свойств нейтрино, которые могли бы быть связаны с дополнительными экзотическими размерностями, расширяющие геометрию видимого  $D=(3+1_{\tau})$  – мерного пространства-времени, с Лоренц группой симметрии SO(3,1) и 4-х мерной группой трансляций  $P^4$ .

Более прецизионные измерения β-распада нейтрона  $n \rightarrow p + e^- + \overline{v}$ , идущего через (V-A)-слабые заряженные токи, дают возможность проверить возможность нарушения Т-инвариантности. Хорошо известно, что Стандартная Модель электрослабых взаимодействий с тремя кварклептонными поколениями содержит нарушающий механизм Кабиббо-Кобаяши-Маскавы, что было подтверждено в экспериментах с К- и В- мезонами. Согласно СРТ – инвариантности локальной квантовой теории с группой симметрии SO(3,1), соответственно должна нарушаться и Т-инвариантность. Но до сих пор нару-



шение Т-инвариантности в  $\beta$ -распадах нейтрона не наблюдалось или не хватало точности в соответствующих экспериментах. Заметим, что в последнее время вопросы СРТ-инвариантности тщательно обсуждаются в связи с поисками природы возникновения трех кварк – лептонных поколений в рамках расширенной геометрии  $D=(3_s+1_p)$  – пространства-времени, поэтому нарушение Т-инвариантности могло бы иметь механизм, отличный от стандартной кварковой модели (СКМ [20]), который мог бы привести к тому, что нейтрон мог бы иметь электрический дипольный момент?!

Возможности получать на реакторах нейтринные пучки открывают пути проведения экспериментов с дальними нейтрино, которые могли бы дать нам альтернативное видение геометрии окружающего пространства, отличное от той картины, которую нам дают световые сигналы, посылаемые из Космоса [18, 19].

В этих экспериментах можно проверить границы применимости специальной теории относительности, которые напрямую могли бы быть также связаны с вопросом о дополнительных измерениях пространства-времени. Здесь надо подчеркнуть важность прецизионных измерений волновых свойств нейтрино на разных расстояниях и направлениях, изучение потоков нейтрино с возможным исчезновением некоторой доли их [18, 19].

#### Основные положения работы

Вопросы, связанные с распадом нейтрона его характеристиками, и динамикой процесса и тесно связанные с ним процессы рождения и поведения нейтрино, а также проблема осцилляций солнечных нейтрино, являются тесно связанными тематиками в фундаментальной физике. Поэтому важной является задача поиска инструментов для изучения деталей внутренней структуры нейтрона и атомного ядра. Изучение этих процессов крайне злободневно на настоящем этапе развития. Одним из вариантов изучения этих процессов является анализ их слабых распадов, в частности бетараспадов нейтронов и атомных ядер.

При этом необходимо более детальное изучение их согласия со Стандартной Моделью, включая: исследование нарушений симметрии при распаде, измерение асимметрии бета-распадов, измерение корреляции электрона нейтрино. А также исследования физики за рамками стандартной модели: нарушение Т-инвариантности в бета- распадах нейтрона, экзотические взаимодействия (нарушающие (V-A)-структуру заряженных слабых токов – правые токи).

Поскольку при бета-распадах одним из каналов процессов является рождение нейтрино, эти вопросы целесообразно изучать совместно и комплексно.

В то же время, источники нейтрино, кроме источников солнечных и галактических нейтрино, это источники на базе ускорителей и ядерных реакторов локализованные в местах их дислокации с изотропным их спектром по направлению излучения. И при этом, детекторы нейтрино также являются сложными и объемными техническими объектами, также локализованные в нескольких местах их размещения. Поэтому важным является создание интенсивных источников поляризованных нейтронов обладающих управляемым и выделенным в пространстве направлением поляризации. Это расширяет возможности при изучении бета-распадов и процессов рождения и распространения нейтрино в зависимости от расстояния до детектора и от углов их вылета из источника.

#### Отражение нейтронов от поверхности вещества

В основе селективной сепарации тепловых нейтронов лежит использование эффектов отражения нейтронов от поверхности [4, 5, 10, 13]. В семидесятые годы прошлого столетия, в работах Ю.Г. Абова, П.А. Крупчицкого и других, процессы отражения нейтронов от поверхности вещества были достаточно глубоко изучены.

Работа структуры для селекции нейтронов ЗФС (замедляющее-фокусирующей структуры) существенно определяется отражением нейтронов от поверхности пластин селектирующей структуры. Угол полного внешнего отражения

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

при этом, определяется отношением граничной скорости нейтрона  $v_{zp}$  на поверхности вещества, к скорости  $v_0=2200$  м/с теплового нейтрона. Этот угол равен  $\varphi_s=10'$  для поверхности из графита,  $\varphi_s=12'$  для поверхности из бериллия,  $\varphi_s=10.7'$  для поверхности из железа,  $\varphi_s=11.5'$  для поверхности из никеля и  $\varphi_s=9.5'$  для меди. При этом с уменьшением скорости (температуры) нейтронов угол полного отражения  $\varphi_s$ , растет.

Для полного внешнего отражения нейтронов от поверхности необходимо, чтобы поперечная компонента кинетической энергии нейтрона у поверхности была меньше средней потенциальной энергии отталкивания нейтронов в среде, которая может быть определена и как граничная энергия  $E_{rp}$  нейтронов в среде.



Таблица 1

Вещество	Е <sub>гр</sub> , нэВ	$\lambda_{ m rp}$ , нм	V <sub>rp</sub> , M/C	φ <sub>s</sub> ,'
Al	0.54	123	3.22	5
Cu	1.68	69.8	5.67	9.5
С (графит плотность 2 г/см3)	1.73	68.7	5.67	10
Ве	2.43	58	6.81	12
ВеО (2.9 г/см³)	2.62	55.8	7.08	11
${ m D_2O}~(1.105~{ m r/cm^3})$	1.66	70.2	5.63	8.9
Нерж. сталь 1Х18Н10Т	1.82	67.0	5.90	10.7
Стекло	0.9	95.3	4.15	7
Свинец	0.87	96.9	4.08	6.4

Можно представить следующую таблицу I для граничной энергии  $E_{zp}$ , граничной длины волны  $\lambda_{zp}$ , и поперечной граничной скорости нейтронов  $\nu_{zp}$  и угла полного отражения  $\varphi_s$  для разных веществ на поверхности замедлителя [4, 5, 10].

Угол полного отражения нейтронов можно увеличить до единиц градусов нанесением на поверхность суперзеркальных покрытий. Суперзеркала представляют собой структуры из слоев с различными оптическими потенциалами, нанесенными на подложку. Например, это может быть многослойная система из широкого барьера и тонких периодических слоев из FeCo-Si.

Возможны нейтронные поляризующие суперзеркала, эффективность отражения нейтронов, которыми зависит от величины и направления магнитного поля наложенного на зеркало, например, из CoFe(V)TiZr.

#### Эффект селективной сепарации нейтронов

Для начала представим некоторые радиационные характеристики основных материалов типичных для реакторов ( $maблица\ 2$ ).

При этом:

$$\lambda_s = 1/n\sigma_s$$
;  $\lambda_a = 1/n\sigma_a$ ;  $L = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \lambda_s \cdot \lambda_a}$ ;  $\gamma = 1 - \frac{4}{3} \cdot \frac{l}{L + \frac{2}{3} \cdot l}$ ;

**Таблица 2** Радиационные характеристики материалов [5]

Радиационные характеристики основных материалов (E <sub>n</sub> =0.025эВ)	<sup>238</sup> U	С (графит)	$\mathrm{D_2O}$	H <sub>2</sub> O
Сечение рассеяния, о <sub>s</sub> (барн)	8.90	4.8	13.6	103.0
Сечение поглощения, σ <sub>а</sub> (барн)	2.71	0.003	0.001	0.66
Число перерассеяний до поглощения $N_{_{s}}$	3.3	1600	13600	156
Пробег до рассеяния, $\lambda_{_{\mathrm{s}}}$ (см)	2.4	2.7	2.6	1.1
Пробег до поглощения, $\lambda_{_{\mathrm{a}}}$ (см)	7.8	3845	3.104	45
Диффузионная длина, L см	2.5	54	120	2.7
Альбедо толстого блока, ү	0.22	0.93	0.97	0.57
Число пересечений границы блока, k	1.3	14	33	2.3
Концентрация атомов, п См <sup>-3</sup>	$0.047 \cdot 10^{24}$	0.08.1024	$0.03 \cdot 10^{24}$	$0.03 \cdot 10^{24}$
Длина замедления, Ls см		17.7	11.0	5.4
Средний угол рассеяния, θ град	890	860	70° (наD)	48 <sup>0</sup> (на H)



$$k = \frac{1}{1 - \gamma}; \ \overline{\cos \theta} = \frac{2}{3 \cdot A};$$

$$L_s = \lambda_s \cdot \sqrt{\left(\frac{A}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{18 \cdot A}\right) \cdot \ln\left(\frac{T_0}{T}\right)}, \ N_s = \frac{\sigma_s}{\sigma_a}.$$

где А – масса атома замедлителя;

Т,  $T_{_0}$  – энергия нейтрона до и после замедления.

Для возникновения селективного вывода тепловых нейтронов существенно, чтобы выполнялось соотношение [6, 9, 3]:

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

Что эквивалентно требованию чтобы в процессе перерассеяния нейтронов на веществе замедлителя, за время жизни в веществе ЗФС, нейтрон попал в ее угловую область захвата и ушел в выделенном направлении.

Существенно то, что нейтрон, выходящий из поверхности вещества получает дополнительную энергию равную  $E_{\it ep}$  и при этом получает дополнительную поперечную скорость равную  $v_{\it ep}$  отклоняющую траекторию от поверхности, а нейтрон входящий в вещество, теряет эту энергию и скорость.

Поэтому плоский щелевой канал и поверхность с постоянной кривизной не обладают свойствами селективной сепарации нейтронов.

Для того чтобы щелевой канал, на всей его поверхности, был способен селективно выводить нейтроны из их диффузного поля, он должен иметь переменную, спадающую к выходу кривизну поверхности.

Или граничная энергия на ней должны непрерывно расти в направлении выхода из канала. В этом случае в структуре, в каждой точке поверхности пластин селекции и во всем объеме пакета таких пластин, существует область захвата нейтронов по углам  $\Delta \phi_s$  во всем объеме  $3\Phi C$  – селектирующей структуры замедлителя с малым разбросом по углам, и высокой плотностью потока нейтронов в их тонком пристеночном слое.

Рассматривая процесс селекции нейтронов селектирующей структурой с криволинейными каналами селекции, прежде всего, обратим внимание на закономерности определяющие отражение нейтронов от поверхности этих каналов.

Можно показать, что коэффициент эффективности захвата нейтронов в ходе селекции  $K_{sel}$  может быть представлен [6, 9, 3], как

$$K_{sel} = \frac{\Delta \varphi_s}{\varphi_s} \approx \frac{2 \cdot R_x'}{\sqrt{1 - {y_x'}^2}}.$$

Здесь поверхность селектирующей пластины ЗФС задается в координатах (x,y), где  $R_x'$  – производная изменения радиуса кривизны R селектирующей пластины вдоль ее длины, и  $y_x'$  – про-

Таблица 3

Вещество	(%)	σ <sub>s</sub> (бн)	σ <sub>а</sub> (бн)	$N_s$	l <sub>s</sub> (см)	L(см)	n <sub>m</sub> (см <sup>-3</sup> )	р <sub>т</sub> (г/см <sup>3</sup> )
<sup>1</sup> H <sub>2</sub> O		103,	0,6	$1,7 \cdot 10^2$	0.29	2,7	3,3 ·10 <sup>22</sup>	1.0
¹H	99,985	38,	0.3	$1,3 \cdot 10^{2}$				
<sup>16</sup> O	99,76	3,76	1,9·10-4	$1,9 \cdot 10^4$				
$^{12}\mathrm{C}$	99,90	4,74	3.5·10-3	$1.3 \cdot 10^3$	1,87	39,	$1,1\cdot 10^{23}$	2,25
<sup>13</sup> C	1,10	4,19	1.4·10-3	$3.0 \cdot 10^3$	2,12	67,	$1.1 \cdot 10^{23}$	2,25
<sup>14</sup> C		4,2	<1.4.10-6	$5.0 \cdot 10^6$	2,23	2900,	$1.1 \cdot 10^{23}$	2,25
$^{15}N_{2}^{16}O_{4}$		24,2	48.·10-6	$5.4 \cdot 10^6$				
<sup>15</sup> N	0,37	4,6	2.4·10-5	$1.9 \cdot 10^{5}$				
$^{2}\mathrm{D_{2}O}$	0,015	13,6	1.0.10-3	$1.4 \cdot 10^3$	2,45	120,	$3.0 \cdot 10^{22}$	1,0
$^{2}\mathrm{D}_{2}$	0,015	7,0	1.0.10-4	$7.0 \cdot 10^4$				
<sup>208</sup> Pb	52,3	11,6	4.9·10-4	$1.9 \cdot 10^5$	2,6	240,	$3.3 \cdot 10^{22}$	11,3
<sup>94</sup> Mo	9,12	5,7	1.5·10-2	$3.8 \cdot 10^{2}$	2,5	34,5	$5.8 \cdot 10^{22}$	9,02
<sup>4</sup> He	100,	0,7	-	-	37,0		$2.8 \cdot 10^{19}$	0,18
<sup>27</sup> Al	100,	1,4	2.3·10-1	$6.1 \cdot 10^{0}$			$6,0\cdot10^{22}$	2,7



изводная профиля селектирующей пластины вдоль ее длины.

И если угол полного внешнего поверхностного отражения нейтронов равен  $\varphi_s$ , а радиус кривизны поверхности равен  $\approx R$ , то длина хорды, вдоль которой движется отраженный нейтрон, будет  $L_s \approx R \cdot \sin(\varphi_s)$ , а при этом расстояние между хордой и поверхностью канала, будет  $h_s \approx R \cdot (1 - \cos(\varphi_s))$ .

Представим [1] также и следующую *таблицу 3*. Для примера, для пластины из графита [9]:

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

Выберем пластины поверхность которых имеет профиль части эллипса

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

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

На участке с максимальной эффективностью селекции нейтронов, радиус кривизны поверхности селектирующей пластины составляет около 1 м, длина хорды по которой движется отраженный нейтрон, составляет около  $L_{\rm s}\approx 5$  мм, а  $h_{\rm s}\approx 5$  мкм.

Причем у пластин с b=15 мм,  $K_{sel}$ =15, а y пластин с b=20 мм,  $K_{sel}$ =10 (где: a=150 мм, b=20 мм, эллипс повернут на угол в 2,4 градуса) и размером: a=150 мм, b=15 мм, эллипс повернут на угол в 1,8 градуса.

Приведем фотографию графитовой пластины с профилем поверхности в виде части эллипса, на которой проводилась селекция (рисунки 1, 2) [9].

В этом случае можно оценить плотность при-

стеночного потока нейтронов, выходящего из одиночной пластины ЗФС, как

$$\Phi_{t} = n_{0} \cdot K_{s} \approx n_{0} \cdot \frac{L_{p}}{l_{sh}} \cdot \frac{K_{sel} \cdot \varphi_{s}}{2 \cdot \pi}.$$

Считая, для примера, что плотность диффузного потока тепловых нейтронов в структуре, например, равна  $n_o = 2 \times 10^{13}~{\rm cm^{-2}cek^{-1}}$ , а  $K_{sel} \approx 20$ , получим при толщине потока  $l_{sh} \approx 0.03~{\rm mm}$ , где  $K_s \approx 60$ , плотность пристеночного потока нейтронов, выходящих из одиночного канала селектирующей структуры, увеличится до  $\Phi_l \approx 1.\times 10^{17}~{\rm cm^{-2}cek^{-1}}$ . При этом, поскольку эта величина существенно зависит от технологии и качества обработки поверхности селектирующих пластин, то реально плотность может быть ниже. Для ЗФС чистота обработки поверхности селектирующих пластин должна быть зеркальной.

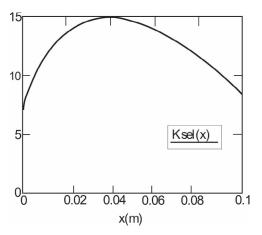
# Концентрирование потоков тепловых нейтронов от группы селектирующих пластин ЗФС

Возможно, изготовление группы селектирующих элементов в виде пакета, в том числе кругового цилиндрического пакета, который концентрирует поток нейтронов в приосевой области протяженной ЗФС (рисунки 3, 4).

Сформированные пакетом селектирующих элементов потоки можно направить в выделенную геометрической структуры пакета область и сфокусировать там. Плотность потока в области фокуса пакета селектирующих элементов можно оценить как:

$$\Phi_{ft} = \Phi_t \cdot N_{struct} \cdot \frac{l_{sh}}{R_f \cdot tg(\varphi_s)} \approx n_0 \cdot \frac{L_p}{l_{sh}} \cdot \frac{K_{sel} \cdot \varphi_s^2}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{R_{sel} \cdot \varphi_s^2}{R_s \cdot tg(\varphi_s)}$$

$$\cdot N_{struct} \cdot \frac{l_{sh}}{R_f \cdot \varphi_s}$$
 ,



**Рис. 1.** Зависимость эффективности селекции на поверхности пластины



**Рис. 2.** Фотография изготовленной графитовой селектирующей пластины



**Рис. 3.** Фотография изготовленного пакета селектирующих элементов

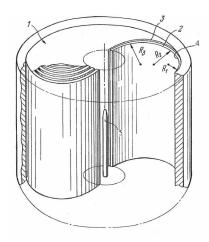


Рис. 4. Пример выполнения ЗФС

где  $R_{\it f}$  – расстояние от точки выхода нейтронов с селектирующего элемента до фокуса пакета элементов;

 $N_{_{struct}}$  — количество элементов в селектирующем пакете, так при цилиндрической ЗФС,  $R_{_f}=100$  мм и  $l_{_{sh}}=0.7$  мм,  $N_{_{struct}}\approx900$  шт.

Тепловые нейтроны реактора, достигая ЗФС перерассеиваются на его веществе, и попав в угловую область захвата на поверхности пластин, двигаются в пристеночном слое пластин в направлении продольной фокусной области на его оси. Толщина селектированного потока тепловых нейтронов может составлять единицы микрон, а поскольку плотность нейтронов в потоке растет с увеличением площади пластин, то плотность в потоке может превышать плотность исходного диффузного поля тепловых нейтронов [6] реактора в котором помещены селектирующие пластины.

То есть плотность потока нейтронов в области протяженного линейного фокуса в глубине цилиндрической ЗФС может быть увеличена еще на два порядка вплоть до величины в  $\Phi_{y} \approx 1. \times 10^{19} \, \, \mathrm{cm}^{-2} \mathrm{cek}^{-1}$ . Что представляет интерес

для самых разных технических устройств и экспериментальных исследований. При этом в варианте источника нейтрино на базе нейтронов, фокусная область должна быть пуста.

# Управление потоком и поляризацией тепловых нейтронов в фокусной области ЗФС

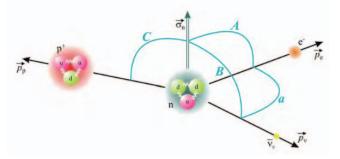
Для начала рассмотрим вариант, в котором используются реакторные нейтроны какого-либо экспериментального реактора. В этом случае поместим протяженную ЗФС внутрь его канала. Причем снаружи ЗФС должна быть охвачена катушкой формирующей продольное магнитное поле. На поверхности его селектирующих пластин должно быть нанесена тонкая пленка из магнитного материала, возможно в виде суперзеркального магнитного покрытия. При этом поляризация нейтронов уже при однократном отражении от поверхности пластин, может достигать 97%.

Поэтому, нейтроны в виртуальном продольном облаке внутри ЗФС в результате их многократного отражения от поверхности селектирующих пластин поляризованы, и при этом направление их поляризации управляется величиной и направлением внешнего магнитного поля. В результате, эффективностью ЗФС можно управлять, изменяя внешнее наложенное магнитное поле, что резко улучшает динамику управления процессами в источнике вплоть до мили- и микросекундного диапазона.

# Изучение закономерностей распадов нейтронов

Прежде всего, рассмотрим закономерности бета-распада нейтронов (рисунок 5). Известно, что время жизни свободного нейтрона составляет примерно 11 минут, и он распадается при этом с образованием протона, электрона и электронного антинейтрино.

Если обозначить единичные векторы направлений вылета электрона и антинейтрино  $p_e$  и  $p_v$ , а спина распадающегося нейтрона  $\sigma$ , то вероят-



**Рис. 5.** Корреляции между коэффициентами а, A, B, C при распаде



ность распада в единицу времени можно, как известно, в общем виде записать так [14]:

$$W(E, p_e) = \rho(E_e) \cdot \left(1 + 3 \cdot \left|\lambda\right|^2\right)$$

$$\cdot \left\{ 1 + a \frac{(\vec{p}_e \cdot \vec{p}_v)}{E_e E_v} + b \frac{m_e}{E_e} + \sigma_n \cdot \left( A \frac{\vec{p}_e}{E_e} + B \frac{\vec{p}_v}{E_v} + D \frac{\vec{p}_e \times \vec{p}_v}{E_e E_v} \right) \right\},$$

где  $\rho(E)$  – функция энергии электрона, т.е. форма бета-спектра;

a, A, B и D – константы соответствующих угловых корреляций [14, 23].

$$\lambda = \frac{g_A}{g_A}$$

 $\lambda = \frac{g_{A}}{g_{V}}$  – отношение аксиального и векторного формфакторов распада.

При этом Гамильтониан:

$$\boldsymbol{H}_{weak} = \frac{G_{F} \boldsymbol{V}_{ud}}{\sqrt{2}} \cdot \left\langle \boldsymbol{p} \middle| \boldsymbol{1} \cdot \boldsymbol{\gamma}^{\mu} - \lambda \boldsymbol{\gamma}^{\mu} \boldsymbol{\gamma}^{5} \middle| \boldsymbol{n} \right\rangle \!\! \left\langle \boldsymbol{e}^{-} \middle| \boldsymbol{\gamma}_{\mu} - \boldsymbol{\gamma}_{\mu} \boldsymbol{\gamma}_{5} \middle| \boldsymbol{v}_{e} \right\rangle + h.c.$$

Для Ферми переходов  $g_{\scriptscriptstyle V} = G_{\scriptscriptstyle F} \cdot V_{\scriptscriptstyle ud}$  .

Для Гамова-Теллера переходов  $g_V = G_F V_{ud} \lambda$ . Корреляции, характеризуемые коэффициентами A и B (между направлениями вылета элек-

трона и соответственно - нейтрино и спином нейтрона), связаны с нарушением пространственной четности в слабом взаимодействии. Отличие от нуля константы тройной корреляции Dозначало бы нарушение временной четности и существование дипольного момента электрона.

Эти величины определяют:

Корреляцию между нейтрино и электроном

$$a = \frac{1 - \left|\lambda\right|^2}{1 + 3\left|\lambda\right|^2};$$

Время жизни нейтрона

$$\tau^{-1} = \frac{2\pi}{h} \cdot G_F^2 \cdot V_{ud}^2 \cdot \left(1 + 3\left|\lambda\right|^2\right) \cdot \int \rho(E_e) ;$$

Бета асимметрию  $A = -2 \frac{\left|\lambda\right|^2 + \operatorname{Re}\lambda}{1 + 3\left|\lambda\right|^2}$ ;

Асимметрию нейтрино  $B = 2 \frac{\lambda^2 - \lambda}{1 - 3\lambda^2} \approx 0.98$ ;

Тройную корреляцию векторов  $D = 2 \frac{\text{Im } \lambda}{1 - 3 \lambda^2}$ 

Эти величины были экспериментально измерены [14, 24]:

Угловая корреляция между направлениями вылета электрона и антинейтрино:  $a = -0.091 \pm 0.039$ .

Корреляция между спином нейтрона и направлениями вылета электрона: A = -0,1186 ± 0,009

Корреляция между спином на и направлениями вылета антинейтрино:  $B = 0.995 \pm 0.035$ 

Тройная корреляция между спином нейтрона, направлениями вылета электрона и антинейтрино:  $D \sim -6 \pm 13 \cdot 10^{-4}$ 

При этом существенно, что существует связь между векторами вылета частиц:

$$D\vec{\sigma}_{n} \frac{\vec{p}_{e} \times \vec{p}_{v}}{E_{e}E_{v}} = D\vec{\sigma}_{n} \frac{\vec{p}_{e} \times \left(-\vec{p}_{e} - \vec{p}_{p}\right)}{E_{e}E_{v}} = -D\vec{\sigma}_{n} \frac{\vec{p}_{e} \times \vec{p}_{p}}{E_{e}E_{v}}$$

и знание направлений вылета частиц упрощает изучение этих корреляций, включая и дипольный момент электрона.

Таким образом, мы имеем некоторое устройство – ЗФС, формирующее внутри себя область с радиальным, поперечным ее оси, потоком поляризованных нейтронов, являющееся высокоинтенсивным источником нейтрино. Нейтрино рождаются в процессе слабого распада нейтронов и при этом рождаются также протон и электрон [14] (рисунок 6).

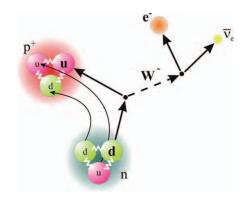


Рис. 6. Схема распада нейтрона

Поскольку в нашем случае нейтрон является поляризованным, то тем самым в процесс анализа изначально присутствует выделенное направ-

Все устройство для формирования поляризованного пучка нейтронов, в процессе многократного отражения их от поверхности элементов ЗФС содержащих магнитные пленки на поверхности, помещено в сильное магнитное поле параллельное оси ЗФС.

Поэтому, быстрые частицы, рожденные при распаде со скоростью  $v_0$ , имеют направленную вдоль магнитного поля аксиальную составляющую  $v_{10}=v_0cos\alpha$  их скорости, и  $v_0=v_0sin\alpha$  – составляющую скорости направленную перпендикулярно магнитному полю. При рождении заряженных частиц в магнитном поле  $B_{\scriptscriptstyle 0}$ , наличие v формирует круговое движение частиц с Ларморовским радиусом, зависящим от величины магнитного поля. В отсутствии электрического поля в системе, при переходе частицы в область

с другим значением магнитного поля В, полная кинетическая энергия частиц сохраняется, но при этом, значения продольной и поперечной скоростей заряженных частиц изменяются [16].

$$v_{\parallel} = v_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{B}{B_0} \sin^2 \alpha} \ .$$

Отсюда, зная полную и составляющие скорости частиц в зоне контроля, полную и продольную или поперечную энергии заряженных частиц, мы можем определить углы, под которым при распаде родились заряженные электрон и протон:

$$\sin \alpha = \sqrt{\frac{B}{B_0} \left( 1 - \left( \frac{v_{\parallel}}{v_0} \right)^2 \right)} = \sqrt{\frac{B}{B_0} \left( 1 - \frac{W_{\parallel}}{W_0} \right)} = \sqrt{\frac{B}{B_0} \cdot \frac{W_{\perp}}{W_0}} \cdot$$

Таким образом, нам необходимо, прежде всего, определить полную и продольную или поперечную энергии заряженных частиц каждого распада.

Полная энергия частиц определяется относительно легко – установкой полупроводниковых или сцинтилляционных детекторов для заряженных р и е, на торцах магнитных ловушек.

С контролем продольной скорости и энергии частиц ситуация обстоит сложнее.

Установленные на пути траекторий dE/dx детекторы будут характеризовать не долю от продольной составляющей скорости, а долю полной энергии частиц.

Установка времяпролетных детекторов для протонов и электронов, возможна. Это приведет к увеличению продольной базы детектора и потребует применения «быстрой» электроники, но это не критично. При этом важно, чтобы регистрировалась продольная скорость и полная энергия протона и электрона при распаде одного и того же нейтрона, по совпадению времени попадания в детекторы и именно их данные использовались при восстановлении угла вылета частиц и при анализе спектра интенсивности выхода от их угла выхода.

А затем из кинематики распада можно восстановить и угол выхода нейтрино к оси его поляризации при распаде и его энергию.

Кроме того, поскольку процесс распада нейтрона идет через промежуточный W бозон, то формально, пренебрегая внутренними связями можно найти и направление его движения от момента рождения в n-p трансформации до момента распада на e-v.

Поскольку энергия рожденных быстрых протонов (до 700 эВ), а электронов (до 750000 эВ) и их массы существенно различаются [17], то должны различаться и устройства которые де-

тектируют их энергию. Поэтому в установке целесообразно поток каждого из видов частиц направлять на свой детектор используя соответствующие зеркала.

Так как энергия рожденных быстрых протонов невелика (до 700 эВ) то целесообразно с одной стороны реакторной зоны установки поставить электростатическое отражающее зеркало с потенциалом запирания около +1 кВ, а детектор полной энергии для протонов установить с другой стороны реакторной зоны. При этом, отразившись от зеркала, противоположно направленные протоны вместе с протонами направленными прямо, после прохождения времяпролетного детектора скорости, достигнут детектора полной энергии. Эта информация, позволит восстановить угол к оси, выхода протонов при распаде и их поток, ориентированный в этом направлении.

При этом, поскольку энергия электронов (до 750000 эВ) существенно отличается от энергии протонов, и установка электростатического зеркала с потенциалом –1 МВ, является достаточно сложной задачей целесообразно использовать отражатель в виде магнитной пробки, которая должна располагаться со стороны датчика протонов.

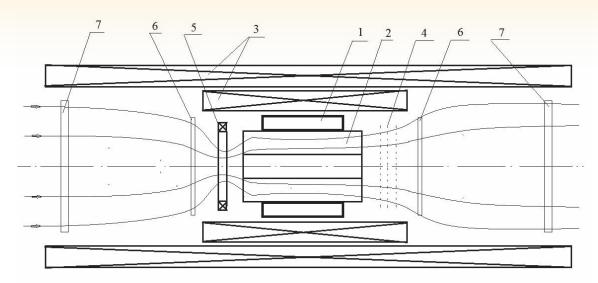
При этом электроны в основном имеют при рождении ненулевое у и замагничены, а поэтому электроны, двигающиеся к датчику протонов отразятся от магнитной пробки и будут двигаться совместно с попутными электронами в направлении времяпролетного детектора скорости, а затем достигнут своего детектора полной энергии. При этом доля приосевых электронов проскочивших сквозь магнитную пробку, невелика и они наименее информативны для анализа структуры нейтрона.

В результате эксперимента будут получены углы  $\alpha_e$ , для электронов и  $\alpha_p$  протонов к направлению поляризации нейтрона, под которыми они родились при распаде, что позволит найти а, A, B, C, D – константы соответствующих угловых корреляций.

Возможен интегральный анализ с использованием электрического и магнитного зеркала путем уменьшения напряжения и тока в них, изучения возникающих при этом спектров и восстановление продольной и поперечной энергии путем сканирования и анализа полного спектра по энергии. Отсюда схема экспериментальной установки (рисунок 7).

При использовании широкополосных детекторов полной энергии, рожденных p и e, и при более сложных программах анализа сигналов с них, эксперимент можно проводить и без ис-





**Рис. 7.** Схема экспериментальной установки (1 -источник нейтронов, 2 -3 $\Phi$ C, 3 -катушки формирования ведущего магнитного поля, 4 -электростатическое зеркало, 5 -магнитное зеркало, 6 -передний датчик времяпролетной базы, 7 -датчик полной энергии частицы)

пользования магнитного и электростатического зеркал.

Источник нейтронов для эксперимента может иметь различную природу. В случае реакторных нейтронов, вариант помещения установки в канал реактора, крайне сложен технологически и ограничен по возможностям. Представляет интерес канальный вывод пучка из реактора в направлении  $3\Phi C$  и его последующее использование в установке. При этом размеры  $3\Phi C$  должны быть больше диффузионной длины нейтронов, L в веществе.

# Создание на базе ЗФС импульсного направленного источника нейтрино с поляризацией тепловых нейтронов

Существует задача создания нейтринного направленного источника электронных антинейтрино. Рассмотрим возможный его вариант.

Нам важно, что экспериментально, с достаточно высокой точностью  $B\approx 1$ , было показано, что при распаде нейтрона, нейтрино движется вдоль направления поляризации распадающегося нейтрона и тем самым, управляя внешним магнитным полем которое управляет направлением поляризации, можно управлять направлением потока нейтрино. При этом угловое распределение нейтрино при распаде поляризованного нейтрона [15, 22]:

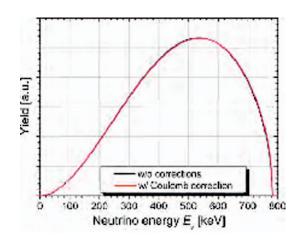
$$1 + \rho_{\nu} \cdot \vec{n}_{\nu} \cdot \vec{\eta}$$
, где:  $\rho_{\nu} = \frac{2 \cdot (\lambda^2 + \lambda)}{1 + 3 \cdot \lambda^2} \approx 1$ ,

где  $\vec{n}_{v}$  – вектор скорости нейтрино в единицах;  $\vec{\eta}$  – единичный вектор в направлении поляризации нейтрона;

$$\lambda = g_1/f_1 = 1.2731 \pm 0.007;$$

 $\vec{v}_e$  – вектор скорости электрона в единицах, где c = 1.

Таким образом, при данном угловом распределении коэффициент усиления потока нейтрино в выделенном поляризацией направлении будет составлять величину около  $K_f$ =2. Это, при использовании ЗФС и формирования области с потоком поляризованных нейтронов, дает возможность для создания источника с направленным по направлению спина нейтрона, интенсивным потоком. Но при этом пучок весь будет идти в направлении поляризации, но обладать достаточно большой угловой расходимостью пучка нейтрино относительно направления поляризации нейтрона.



**Рис. 8.** Спектр нейтрино по энергии при распаде нейтрона [17]



Величина граничной энергии спектра нейтрино равна, согласно последним данным,  $E_{vmax} \approx 780$  кэВ (см. pucynok 8). В пике  $E_{vpik} \approx 550$  кэВ. Отсюда, поскольку поперечная энергия движущегося теплового нейтрона до распада равна 0.025 эВ, коррекция направления вылета нейтрино, за счет поперечного импульса потока нейтронов сформированного в источнике, невелика и будет составлять лишь  $0.06 \div 0.12$  угловых градусов.

Сделаем оценку потока нейтрино от источника на базе ЗФС с локализацией в ней распадов поляризованных реакторных нейтрино. Вначале оценим фон.

Количество делений в реакторе на 1 МВт мощности  $3*10^{16}$  1/МВт сек.

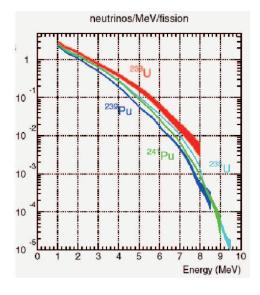
Средний выход нейтрино в реакторе [26]  $10^8$  1/MBT сек см², что для реактора ПИК, Гатчина при мощности 100 MBT составляет  $10^{16}$  1/сек см² (см. рисунок 9).

Поток тепловых нейтронов в реакторе ПИК, Гатчина, Россия при планируемой мощности 100 МВт составляет  $45*10^{14}$  1/сек см<sup>2[25]</sup>. Отсюда выхол:

 $10^{16}\,\mathrm{cek^{\text{-1}cm^{\text{-}2}}}/\,45^*10^{14}\,\mathrm{cek^{\text{-1}cm^{\text{-}2}}}\thickapprox2$  нейтрино на 1 нейтрон в реакторе.

При этом на каждый акт деления рождается примерно 2.5 нейтронов и выгорает 1 нейтрон, таким образом, потенциально возможно полезно использовать 1.5 нейтрона на каждый акт деления при высокой культуре обращения с нейтронами в реакторе.

В то же время, несмотря на то, что время жизни нейтрона составляет  $\tau_n = 11$  мин, реально он даже в графите живет, всего лишь  $t_n = 0.017$  сек,



**Рис. 9.** Спектр нейтрино по энергии при распадах актинидов в реакторе [27]

пройдя за это время в веществе 3845 см за  $N_s = 1300$  перерассеяний на его ядрах. И при этом успевает распасться по бета- каналу всего лишь  $2.6*10^{-5}$  часть нейтронов.

Для создания интенсивного источника нейтрино нам необходимо увеличить как количество нейтронов находящихся внутри его внутренней зоны дрейфа ЗФС, так и время жизни отселлектированных нейтронов внутри нее. Поэтому нам важны как внутренний объем зоны дрейфа ЗФС и увеличение ее размеров, так и снижение скорости движения нейтронов в ней путем уменьшения температуры нейтронов в ней. Это одновременно увеличивает и эффективность селекции нейтронов, увеличивая угол полного отражения нейтронов на поверхности его вещества.

Пусть радиус ЗФС источника  $R_f=50$  см,  $L_f=100$  см,  $n_o\approx 45*10^{14}$  1/(сек см²) (для интенсивности реактора ПИК),  $l_{sh}=0.7$  мм,  $v_n=2200$  м/с,  $K_{sel}=20$ ,  $T_f=3$  K,  $T_o=300$  K.

Было принято, что источник находится при температуре жидкого гелия, но в диапазоне не ультрахолодных а холодных нейтронов. При этом угол полного отражения нейтронов увеличился в 10 раз, а количество перерассеяний нейтронов на ядрах замедлителя из графита до захвата в область селекции составило

$$N_{out} \approx \frac{\pi}{K_{sel} \cdot \phi_s} \approx 6.$$

Отсюда, путь проходимый холодным нейтроном в ЗФС до поглощения составит , время жизни нейтрона до распада будет  $\tau_{\text{viid}} \approx 1$  сек, а доля нейтронов распадающихся по бета-каналу составит  $\delta_n = 1.6*10^{-3}$  от их количества вошедшего в ЗФС

При этом максимальную интенсивность источника нейтрино на базе ЗФС принятой геометрии в зоне концентрации нейтронов можно оценить как:

$$\begin{split} & \varPhi_{v} \approx \varPhi_{t} \cdot (L_{f} \cdot l_{sh}) \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot R_{f}}{l_{sh}} \cdot \frac{\tau_{vita}}{\tau_{n}} \cdot \frac{2}{\pi \cdot {R_{f}}^{2}} \approx \\ & \approx n_{0} \cdot \frac{L_{f} \cdot L_{p}}{l_{sh} \cdot R_{f}} \cdot \frac{2 \cdot \left(l_{s} \cdot N_{out} + 2 \cdot R_{s}\right) \cdot N_{s}}{\tau_{n} \cdot v_{n} \cdot \sqrt{\frac{T_{f}}{T_{0}}} \cdot N_{out}} \approx \end{split}$$

$$\approx 1 \cdot 10^{16} \cdot 1/(cM^2 \cdot ce\kappa).$$

Видно, что для увеличения интенсивности источника свыше фона реактора при сохранении его рабочих характеристик, необходимо увеличить глубину селектирующих пластин



 $L_p$ , увеличить плотность их упаковки уменьшив  $l_{sh}$ , и увеличить длину источника  $L_f$ . Для источника полезным является его охлаждение и переход к холодным нейтронам (XH).

В то же время, для дальних детекторов нейтрино значимым является не яркость источника нейтрино, а доля количества нейтрино рожденных в нем в сравнении с количеством нейтрино рожденных в базовом реакторе частью которого является данный источник нейтрино и который определяет фон источника.

Поэтому, в качестве базового реактора надо выбирать реактор с высокой удельной мощностью, но с малой полной мощностью, а более правильно ориентироваться на целевой реактор-источник.

Кроме того, поскольку угол полного отражения нейтронов зависит от величины внешнего магнитного поля, и при этом, управляя его величиной можно управлять скоростью вывода нейтронов внутрь ЗФС и, кроме того, управляя направлением внешнего наложенного на ЗФС магнитного поля можно управлять направлением вылета формируемого потока нейтрино, то целесообразен импульсный режим работы источника.

При этом, согласовывая режим посылаемых коротких импульсов от источника нейтрино со временем их приема на детекторах нейтрино можно изучать закономерности распространения их в среде, включая волновые свойства и закономерности осцилляций в зависимости от расстояния до источника и угла выхода к направлению поляризации.

#### Повышение эффективности канального вывода нейтронов

На предыдущем этапе работы была предложена схема эксперимента для изучения внутренней структуры нейтронов и вариант создания интенсивного источника нейтрино.

В этих условиях возникла задача эффективного вывода потока нейтронов на область ЗФС экспериментальной установки или на область ЗФС источника нейтрино.

Рассмотрим следующую схему канального вывода нейтронов из области активной зоны теплового реактора (рисунок 10).

Внутри канала реактора в области максимума его теплового потока размещается ЗФС с пакетом селектирующих пластин направленных вдоль канала в направлении его выхода. Вне канала реактора, снаружи также размещается ЗФС с пакетом селектирующих пластин направленных в канал реактора и возвращающих тепло-

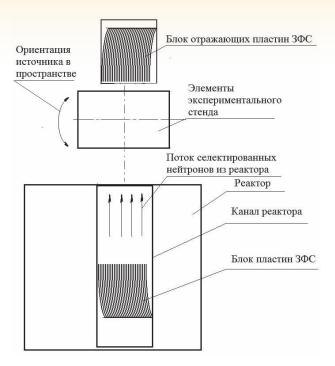


Рис. 10. Схема канального вывода нейтронов к экспериментальной установке (дан вид сверху для горизонтального канала реактора)

вые нейтроны обратно в реактор, в случае если поглощение потока нейтронов в зоне экспериментальной установки мало.

Между этими двумя блоками ЗФС, снаружи реактора, размещен стенд установки для экспериментального изучения процесса распада нейтронов, или стенд источника нейтрино. При этом в варианте источника нейтрино, блок установки должен содержать устройства привода для выбора и коррекции направления формируемого потока нейтрино.

#### Заключение

В работе показано, что возможно создание эффективного инструмента, который позволяет получить управляемые пучки реакторных нейтронов и нейтрино. При этом:

- 1. Могут быть увеличены интенсивность и величина поляризации потоков нейтронов в области их полезного применения.
- 2. Возможно создание экспериментальной установки с выделением чистых бета- распадов, позволяющей получать полную кинематику распада и увеличить точность изучения его формфакторов.
- 3. Выделение направления потока антинейтрино при распаде поляризованных нейтронов позволяет получать их управляемые пучки.
  - 4. Возможно создание коротких импульсов



# 103(45)2017

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

антинейтрино, точное знание их энергии и времени вылета которых, создает условия изучения волновых свойств антинейтрино.

#### Литература

- 1. Способ управляемого термоядерного синтеза и управляемый термоядерный реактор для его осуществления. Патент RU №2056649.
- 2. Способ получения энергии в процессе управляемого деления ядер и устройство для его осуществления. Патент RU №2075116.
- 3. Способ и устройство для нейтронного легирования вещества. Заявка №2012156229/05(088941) Патент RU №2514943.
- 4. Гуревич И.И., Протасов В.П. Нейтронная физика. М.: Энергоатомиздат, 1997.
  - Власов Н.А. Нейтроны. М.: Наука, 1971.
- 6. Устройство для формирования направленного потока нейтронов. Патент RU №1821818.
- 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. Баранов П.Г. Особенности нейтронного легирования фосфором кристаллов кремния, обогащенных изотопом 30Si // Физика и техника полупроводников, 2006. Т. 40. Вып. 8.
- 9. Варлачев В.А., Дробышевский Ю.В., Некрасов С.А., Петров Г.Н., Прохоров А.К., Столбов С.Н. Экспериментальная регистрация селективной сепарации тепловых нейтронов, http://sci-article.ru/stat.php?i=1401523674
- 10. Игнатович В.К. Нейтронная оптика. М.: Физматлит, 2006.
- 11. Дробышевский Ю.В., Столбов С.Н. Ядерная энергетика с внутренним топливным циклом и высокой глубиной выгорания топлива. SCI-ARTICLE №18 2015 http://sci-article.ru/stat.php?i=1422805510
- 12. Дробышевский Ю.В., Столбов С.Н. Термоядерный реактор с внутренним каталитическим циклом, SCI-ARTICLE №16 2014 http://sci-article.ru/stat. php?i=1418333672
  - 13. Абов Ю.Г., Гулько А.Д., Крупчицкий П.А. По-

- ляризованные медленные нейтроны. М.: Атомиздат, 1996.
- 14. Ерозолимский Б.Г. Бета-распад нейтрона // УФН, 1975. Т. 116. Вып. 1.
  - 15. Окунь Л.Б. Лептоны и кварки. М.: Наука, 1981.
- 16. Альвен Г., Фельтхаммар К.Г. Космическая электродинамика. М.: Мир, 1967.
- 17. Gertrud Emilie Konrad, Measurement of the Proton Recoil Spectrum in Neutron Beta Decay with the Spectrometer aSPECT Study of Systematic Effects, Mainz, 2011.
- 18. G. Volkov, "Geometry of Majorana neutrino and new symmetries", "Annales Fond Broglie 31,227, 2006" short version in [hep-ph/0607334]
- 19. D.S. Baranov and G.G. Volkov «Neutrino And Extra World» based on talk given by G.G.V. at the Workshop SHQCD12, Gatchina, St. Petersburg, Russia, 4-8 July 2012 arxiv:1211.4708
- 20. G.G. Volkov, V.A. Monich, and B.V. Struminski, Oscillation and CP-violation in horizontal interactions Fiz 34, 435 (1981)., Phys.Lett.B104382(1981)
- 21. Proposal for an Experiment at the Spallation Neutron Source Precise Measurement of the Neutron Beta Decay Parameters "a" and "b" The Nab Experiment R. Alarcon, S. Balascuta Department of Physics, Arizona State University, Tempe, AZ 85287-1504
- 22. Robert Eugene Marshak, E.C.G. Sudarshan, "Introduction to elementary particle physics" Interscience Publishers, 1961
- 23. Stefan Baesler, "Neutron Beta Decay Correlations: Part 1: ...within the Standard Model" University Virginia.
- 24. R. Alarcon, S. Balascuta et all, Precise Measurement of the Neutron Beta Decay Parameters "a" and "b", Proposal for an Experiment at the Spallation Neutron Source.
- 25. Серебров А.П. Исследования фундаментальных взаимодействий в ПИЯФ НИЦ КИ с нейтронами и нейтрино на реакторах // УФН, 2015. Т. 185. №11. С. 1179-1201.
- 26. John G Learned, "Neutrinos and Arms Control Thinking Big about Detection of Neutrinos from Reactors at Long Distances" University of Hawaii Man.
- at Long Distances" University of Hawaii Man. 27. Jun Cao, Determining Reactor Neutrino Flux, Nuclear Physics B Proceedings Supplement 00 (2013) 1–5.

УДК 62-503.5

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ШИРОКОПОЛОСНОЙ СЛУЧАЙНОЙ ВИБРАЦИИ НА МОДУЛЬ ЭЛЕКТРОННОГО УСТРОЙСТВА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ КОНТРОЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ АППАРАТУРЫ

COMPUTATIONAL MODELING OF THE EFFECT OF BROADBAND RANDOM VIBRATION ON THE ELECTRONIC DEVICE MODULE DURING INSTRUMENT CONTROL TESTS

#### Геннадий Алексеевич Гордеев

начальник управления систем и средств защиты

МОУ «ИИФ»

Адрес: 142210, Московская обл.,

г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а

Тел.: 8(4967)35-31-93 E-mail: sng@iifmail.ru

#### Артём Геннадьевич Букин

кандидат технических наук, доцент ведущий научный сотрудник

МОУ «ИИФ»

Адрес: 142210, Московская обл.,

г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а

Тел.: 8(4967)35-31-93

E-mail: bukin.artem@gmail.com

#### Василий Викторович Попов

начальник отдела специальных технологий и средств защиты

МОУ «ИИФ»

Адрес: 142210, Московская обл.,

г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а

Тел.: 8(4967)35-31-93 E-mail: sng@iifmail.ru

#### Алина Сергеевна Пономарёва

кандидат физико-математических наук

старший научный сотрудник

МОУ «ИИФ»

Адрес: 142210, Московская обл.,

г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а

Тел.: 8(4967)35-31-93 E-mail: sng@iifmail.ru

#### Аннотация

В статье рассматривается воздействие широкополосной случайной вибрации на модуль электронной аппаратуры. Показано, что при вычислительном моделировании определяется суммарный статистический отклик аппаратуры на воздействие вибрации, учитывающий наличие в случайном сигнале критических резонансных частот. При этом вычисляется среднеквадратичное значение амплитуды отклика (деформации, ускорения, скорости и др.)

**Ключевые слова:** печатная плата, элементы радиоэлектронной аппаратуры, воздействие широкополосной случайной вибрации, виброускорение, спектральная плотность мощности, статистический отклик аппаратуры, критические резонансные частоты.

#### Summary

The article describes effect on broad-band random vibration on the module of electronic equipment. The total statistical equipment response to the vibration effect is determinated taking into account the presence of critical resonance frequencies in the random signal. In this case, the rms-value of equipment response (deformation, acceleration, velocity) is calculated.

**Keywords:** printed circuit board (PCB), elements of electronic equipment, effect on broad-band random vibration, power spectral density (PSD), statistical response of equipment, critical resonance frequencies.

#### Введение

Испытания радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) на устойчивость и прочность при воздействии широкополосной случайной вибрации (ШСВ) проводят по нормам, указанным в техническом задании (ТЗ). На этапе конструирования изделия и изготовления опытных образцов осуществляется вычислительное моделирование вибрационного воздействия с целью определения критических резонансных частот и их влияния на отклик аппаратуры при заданных ре-

жимах эксплуатации. Изделие должно быть работоспособным и сохранять внешний вид при плавном изменении частоты в заданном диапазоне по каждой из трех осей после воздействия ШСВ, спектральная плотность виброускорения (в единицах  $g^2/\Gamma u$ ) которой задана в ТЗ.

Широкополосная случайная вибрация представляет собой совокупность синусоидальных волн различной амплитуды и частоты. Разложение на множество гармоник, соответствующих частотному спектру, получается при применении



прямого преобразования Фурье к случайному сигналу, зафиксированному на измерительном датчике. Вследствие того, что случайный сигнал содержит в своем составе множество частот, имеется вероятность попадания на собственные частоты изделия и возникновения резонанса, могущего привести к разрушению изделия.

При моделировании случайных вибраций не определяется мгновенная амплитуда отклика конструкции, вместо этого рассчитывается некоторая статистическая амплитуда, возникающая с определенной вероятностью. В статистическом анализе случайные вибрации характеризуются стандартным нормальным Гауссовским распределением с нулевой средней величиной (математическим ожиданием  $\mu$ =0) и среднеквадратичным отклонением (или  $\sigma$ -значением). В одномерном случае распределение Гаусса определяется формулой

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}.$$
 (1)

Допустим, что в качестве отклика конструкции вычисляется виброускорение. Для нормального распределения Гаусса выявлено, что мгновенные величины (в данном случае, виброускорения) будут попадать между значениями - $1\sigma$  и + $1\sigma$  на протяжении 68,3% всего времени воздействия; между значениями - $2\sigma$  и + $2\sigma$  на протяжении 95,45% времени; между значениями - $3\sigma$  и + $3\sigma$  на протяжении 99,73% времени [1].

Возбуждение от случайных вибраций при математическом моделировании производится заданием в закрепленных точках конструкции спектральной плотности мощности (Power Spectral Density – PSD), зависящей от частоты. Под PSD понимают меру энергетический интенсивности вибрационного сигнала в частотном диапазоне. В частности, спектральная плотность мощности виброускорения  $G_a(f)$  определяется как средний квадрат виброускорения a(t) в единичной полосе частот [2] и представляется выражением

$$G_a(f) = \frac{1}{B_0 T} \int_0^T a^2(t, B_0, f) dt$$
, (2)

где  $B_{\theta}$  – интервал разрешения в процессе частотного анализа, Гц;

T – период измерения и анализа сигнала, с; f – частота,  $\Gamma$ ц;

 $a(t, B_0, f)$  – мгновенное значение ускорения a(t) после прохождения фильтра с полосой пропускания от  $(f-B_0/2)$  до  $(f-B_0/2)$ , м/с<sup>2</sup>.

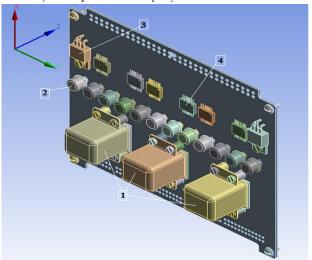
Анализ воздействия случайных вибраций на электронную аппаратуру обычно проводится для большого диапазона частот, например, от 20 до 2000 Гц.

Если нарисовать график зависимости спектральной плотности мощности от частоты, то квадратный корень из величины площади под графиком дает среднеквадратичное (Root Mean Square – RMS) значение случайной величины [1]. RMS является качественной мерой интенсивности вибраций, суммарным откликом конструкции, учитывающим отклик от совпадения случайной с собственной частотой изделия. Так, среднеквадратичное значение сигнала виброускорения агms определяют в соответствии с формулой

$$a_{rms} = \left(\frac{1}{T} \int_{0}^{T} a^{2}(t) dt\right)^{1/2}.$$
 (3)

#### Исходные данные

Вычислительное моделирование воздействия ШСВ в рабочем режиме проведем на примере модуля электронного устройства, представленного в виде печатной платы с элементами РЭА. Трехмерные виды электронного модуля сверху и снизу изображены на рисунках 1а, 16.



**Рис. 1а.** Вид сверху модуля с обозначением элементов: 1 – реле; 2 –транзисторы; 3 – стабилизаторы напряжения; 4 – интегральные микросхемы

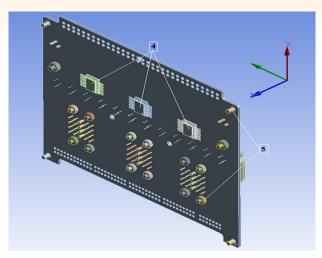
На рисунках обозначены следующие элементы РЭА:

- 1) реле РПС34;
- 2) транзисторы 2Т974А;
- 3) стабилизаторы напряжения К1278ЕР1БП, 142ЕН5А:
- 4) интегральные микросхемы в корпусах 402.16, 401.14.

Для проведения расчетов использовались материалы, близкие по своим характеристикам к реальным: стеклотекстолит – для печатной платы, нитрид кремния – для электронных компонентов, слюда – для прокладок реле, тефлон – для втулок реле, сталь – для соединительных элементов и крепежей.

На поверхности печатной платы имеются дорожки проводников, составляющие частичную





**Рис. 16.** Вид снизу модуля с обозначением элементов: 4 — интегральные микросхемы, 5 — соединительные элементы и крепежи

металлизацию материала платы. Для учета этого стеклотекстолит моделировался с ортотропной прочностью. Таким образом, модуль Юнга и коэффициент Пуассона для материала печатной платы задавался разным по осям X, Y, Z.

Прочностные характеристики материалов, использованные в расчете, представлены в mаблице 1.

Вычислительное моделирование воздействия случайных вибраций на рассмотренный выше модуль электронного устройства возможно провести с использованием профессиональных конечно-элементных пакетов программ таких, как Ansys Workbench, Solid Works и других.

# Моделирование воздействия ШСВ на модуль электронного устройства

Для проведения расчета в геометрической трехмерной модели была построена расчетная сетка. Фрагмент сетки показан на *рисунке* 2.

Для определения результатов воздействия ШСВ на элементы РЭА зададим закрепление платы на винтах. Анализ на собственные частоты системы должен предшествовать анализу на случайные вибрации.

Таблица 1											
Название материала	Плотность, кг/м3		Модуль ГПа	Юнга,	Коэффициент Пуассона						
		Ось Х	Ось Ү	Ось Z	XY	XZ 0,09 0,28 0,3 0,28	YZ				
Стеклотекстолит	1900	21	21	17	0,15	0,09	0,09				
Нитрид кремния	3440		298			0,28					
Слюда	2500		73			0,3					
Тефлон	2250	0,47			0,28						
Нержавеющая сталь	8055		200			0.3					

Таблица 2										
Мода	1	2	3	4	5		18	19	20	
Частота, Гц	110,5	243,35	323,47	364,64	467,64		920,05	921	922,33	

Таблица 3									
Частота, Гц	20	50	100	200	500	800	1000	1400	2000
PSD G, g <sup>2</sup> /Гц	0,005	0,005	0,005	0,005	0,013	0,018	0,018	0,011	0,011

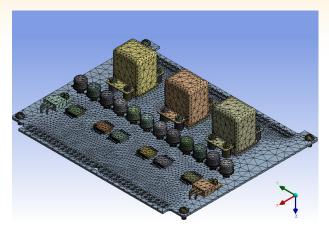


Рис. 2. Вид расчетной сетки модели

В анализе на собственные частоты зададим количество мод, равное 20. Собственные частоты платы, полученные в результате расчета, представлены в  $maблице\ 2$ .

К закрепленным углам платы приложим виброускорение в единицах g, заданное в форме зависимости спектральной плотности виброускорения,  $g^2/\Gamma y$ , от частоты в  $\Gamma y$ . Зависимость спектральной плотности виброускорения (PSD G) по направлению любой из осей от частоты, использованная в расчете, представлена в maónuye 3.

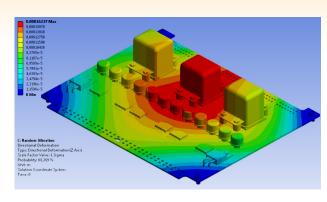
Такого рода зависимости с указанием соответствующей каждому уровню спектральной плотности амплитуды эквивалентных синусоидальных виброускорений в единицах g обычно содержатся в техническом задании на изделие при задании параметров виброиспытаний. Возбуждение в форме зависимости спектральной плотности виброускорения от частоты в настоящем расчете приложено по трем взаимно перпендикулярным направлениям.

На *рисунке 3* показана полученная в результате расчета деформация в метрах по оси Z, нормаль-

ной к плоскости платы. Контуры деформации повторяют форму первых собственных колебаний платы, соответствующих частоте  $110.5 \Gamma u$ .

Как видно из рисунка 3, в 68,3% всего времени воздействия (уровень 1 о) максимальная деформация по оси Z в окрестности среднего реле равна 0,2 мм. Расчеты показали, что в 99,73% всего времени воздействия (уровень 3 о) максимальная величина деформации по оси Z не превысит 0,5 мм.





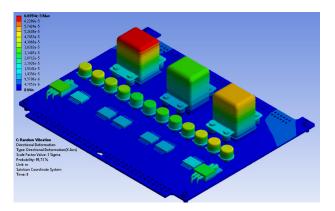
**Рис. 3.** Деформация платы по оси Z при моделировании случайных вибраций в 68,3% всего времени воздействия

Деформации по осям X и Y отличаются незначительно, контуры их на плоскости платы практически совпадают. На рисунке 4 представлена деформация платы по оси Y, максимальное значение которой достигается на крайних реле и в 99,73% всего времени воздействия не превышает 0,07 мм.

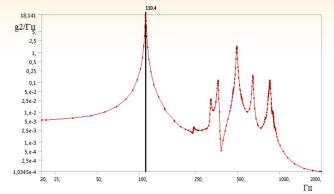
Представляет интерес среднеквадратичное RMS-значение виброускорения в единицах g, показывающее суммарный отклик изделия, учитывающий вклад собственных частот модуля. На рисунке 5 показан график зависимости ответной спектральной плотности виброускорения по оси Z в единицах  $g^2/\Gamma u$  от частоты в  $\Gamma u$  для выбранной точки на поверхности среднего реле.

Локальные максимумы на рисунке 5 соответствуют собственным частотам платы. Можно убедиться, что первый локальный максимум соответствует частоте  $110,4\ \Gamma u$ , совпадающей с первой модой.

Площадь под графиком ответной спектральной плотности виброускорения на рисунке 5 по определению равна среднеквадратичному значению амплитуды виброускорения. Рассчитанное программой RMS-значение ответного виброускорения получилось равным 9,9 g. В дан-



**Рис. 4.** Деформация платы по оси Y при моделировании случайных вибраций в 99,73% всего времени воздействия



**Рис. 5.** Зависимость ответной спектральной плотности виброускорения по оси Z от частоты в выбранной точке на среднем реле. По оси Y — спектральная плотность виброускорения в  $g2/\Gamma q$ ; по оси X — частота в  $\Gamma q$ 

ном случае это значение не превысило заданного в технических условиях на реле РПС34 максимального эксплуатационного значения виброускорения, равного  $10\ g$ . Отсюда можно сделать вывод, что элементы РЭА на данной печатной плате выдержат предложенную эксплуатационную нагрузку во время контрольных испытаний.

#### Выводы

Вычислительное моделирование взаимодействия широкополосной случайной вибрации на элементы РЭА, расположенные на отдельной печатной плате в составе модуля электронной аппаратуры, можно осуществить при помощи различных профессиональных конечно-элементных пакетов программ: Ansys Workbench, Solid Works и других. Описанные в статье расчеты позволяют сделать вывод о максимальных деформациях платы, не превышающих 0,5 мм в 99,73% всего времени воздействия ШСВ. Результаты проведенного вычислительного моделирования - распределение деформаций, значение максимального ответного виброускорения модуля в единицах g – согласуются с экспериментальными данными, полученными при испытаниях модуля в лаборатории.

#### Литература

- 1. Santhosh M.Kumar. Analyzing Random Vibration Fatigue//ANSYS Advantage, Volume II, Issue 3, 2008.
- 2. ГОСТ 31317.2-2006. Вибрация. Лабораторный метод оценки вибрации сидений транспортных средств. Часть 2. Сиденья железнодорожного транспорта.



# Ne3(45)2017

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

УДК 62-503.5

# ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ МОДУЛЯ ЭЛЕКТРОННОГО УСТРОЙСТВА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ КОНТРОЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ АППАРАТУРЫ

COMPUTATIONAL MODELING OF THE HEAT DISSIPATION OF THE ELECTRONIC DEVICE MODULE DURING TESTING OF EQUIPMENT

#### Геннадий Алексеевич Гордеев

начальник управления систем и средств защиты

МОУ «ИИФ»

Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а

Тел.: 8(4967)35-31-93 E-mail: sng@iifmail.ru

#### Артём Геннадьевич Букин

кандидат технических наук, доцент ведущий научный сотрудник МОУ «ИИФ»

Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а

Тел.: 8(4967)35-31-93

E-mail: bukin.artem@gmail.com

#### Василий Викторович Попов

начальник отдела специальных технологий и средств защиты

МОУ «ИИФ»

Адрес: 142210, Московская обл.,

г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а

Тел.: 8(4967)35-31-93 E-mail: sng@iifmail.ru

#### Алина Сергеевна Пономарёва

кандидат физико-математических наук старший научный сотрудник

МОУ «ИИФ»

Адрес: 142210, Московская обл.,

г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а

Тел.: 8(4967)35-31-93 E-mail: sng@iifmail.ru



#### Николай Владимирович Смирнов

научный сотрудник МОУ «ИИФ» Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а

Тел.: 8(4967)35-31-93 E-mail: sng@iifmail.ru

#### Аннотация

В статье рассматривается тепловое взаимодействие элементов радиоэлектронной аппаратуры, расположенных на отдельной печатной плате. Показано, что при задании усредненных тепловых потоков с поверхностей радиоэлементов и теплофизических свойств материалов, близких к исходным, можно получить распределение температур на печатной плате, соответствующее реальному эксперименту. Предельное тепловыделение платы оценивается по результатам стационарного теплового расчета.

**Ключевые слова:** печатная плата, радиоэлектронная аппаратура, тепловыделение платы, распределение температур на плате, стационарный тепловой расчет.

#### Summary

The article describes thermal interaction of electronic equipment elements located on a separate printed circuit board. It is shown that when the average heat fluxes from the radioelement surfaces and the thermophysical material properties close to the real material properties, it is possible to obtain a temperature distribution on the printed circuit board corresponding to the actual experiment. The maximum heat flux by the board is estimated from the results of stationary thermal calculations.

**Keywords:** printed circuit board (PCB), electronic equipment, heat generation by board, temperature profile on board, stationary thermal computation.

#### Введение

При конструировании модуля электронного устройства в составе сложных изделий радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) часто возникает необходимость вычислительного моделирования теплового взаимодействия электронных компонентов. Такая необходимость обусловлена проверкой требований

технического задания (ТЗ) к значениям предельного тепловыделения изделия. При этом надо понимать, что при вычислительном моделировании важно не точное распределение температур на элементах изделия, полученное в результате расчета и зависящее от входных данных, а значение предельного тепловыделения в рабочем режиме эксплуатации.



Источниками теплоты в элементах РЭА являются различные электрические устройства и отдельные радиодетали [1]. Известно, что потребляемая радиодеталями электрическая энергия преобразуется в них в электромагнитную, механическую, тепловую и другие виды энергии. При этом только 5–10% потребляемой радиодеталями энергии превращается в полезные сигналы, остальная – в теплоту [2].

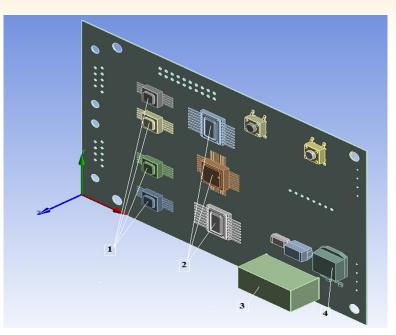
Основная трудность теплового расчета электронных систем связана с учетом взаимного влияния многочисленных компонентов на плате, выделяющих тепло и связанных между собой теплопроводящими материалами в виде проводников. Для теплового расчета характерны приближенное знание входной информации: мощность источников теплоты, коэффициенты теплоотдачи поверхностей, теплофизические свойства тел и других. Кроме того, совокупность радиоизделий на плате обычно работает в сложном переменном во времени электрическом режиме: импульсном, низкочастотном и другом. Выход из этих затруднений связан с приближенным анализом общих закономерностей теплообмена системы тел. Обычно считают, что тепловая инерция электронных компонентов на плате велика по сравнению с длительностью импульсов переключения, поэтому изменение температуры элементов РЭА происходит при постоянной средней мощности активных источников тепловых потоков. При проведении теплового расчета на поверхностях активных электронных компонентов задаются средние тепловые потоки.

#### Исходные данные

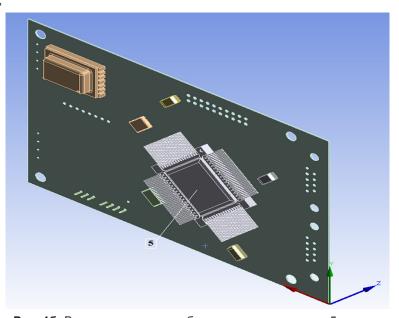
Вычислительное моделирование контроллетепловыделения изделия РЭА проведем на примере модуля электронного устройства, представленного в виде печатной платы с радиоэлементами. Трехмерные виды электронного модуля сверху и снизу изображены на рисунках 1а, 16.

На рисунках обозначены только активные элементы РЭА, в которых происходят процессы выделения теплоты:

- 1) интегральные микросхемы 5559ИН28У;
- 2) приемопередатчики 1564КП11, 1564КП12, 5559ИН4;



**Рис. 1а.** Вид сверху модуля с обозначением элементов: 1 – интегральные микросхемы; 2 – приемопередатчики; 3 – импульсный блок питания; 4 – диод



**Рис. 16.** Вид снизу модуля с обозначением элементов: 5 – микро-контроллер

- 3) импульсный блок питания МДМ10;
- 4) диод 2Д269;
- 5) микроконтроллер 1986ВЕ1Т.

На плате также расположены пассивные элементы, не являющиеся источниками выделения тепла: конденсаторы, диоды, кнопки переключения. Собственно печатная плата состоит из диэлектрика FR-4 и находящихся на поверхности проводящих дорожек из меди диаметром 0,35 мм. Большое количество элементов и сложная геометрия не позволяют моделировать каж-



# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

дую дорожку в отдельности, поэтому при тепловом расчете печатная плата представлена твердым телом с ортотропной теплопроводностью [3]. Таким образом, теплопроводность платы задавалась разной в двух взаимно перпендикулярных направлениях: по нормали (ось Z на рисунках 1а, 16) и вдоль плоскости платы (ХУ на рисунках 1а, 16).

Для проведения расчетов использовались материалы, близкие по своим характеристикам к реальным: стеклотекстолит с ортотропной теплопроводностью – для печатной платы, нитрид кремния – для электронных компонентов. Теплофизические характеристики материалов, использованные в расчете, представлены в таблице 1.

Вычислительное моделирование проводилось при помощи профессионального конечно-элементного пакета программ Ansys Workbench, версия Free Ansys Student.

# Моделирование теплового нагрева модуля электронного устройства

Для проведения стационарного теплового расчета в геометрической трехмерной модели была построена расчетная сетка. Фрагмент сетки показан на рисунке 2.

Граничными условиями расчета являлись задаваемые средние тепловые потоки на поверхностях всех активных элементов РЭА. Тепловая мощность оценивалась по экспериментальным данным, полученным в лаборатории, с учетом температур, до которых теоретически могут нагреться те или иные компоненты в рабочем режиме эксплуатации. На верхней и нижней поверхностях платы применялись условия конвективного теплообмена с коэффициентом теплоотдачи 5,6 Вт/(м² °С) и температурой окружающей среды 25 °С.

Целью теплового расчета являлось определение суммарного теплового потока от модуля электронного устройства.

В случае если требуется рассчитать тепловыделение изделия в течение определенного промежутка времени, то проводится нестационарный тепловой расчет с заданием средних тепловых потоков на поверхности каждого электронного элемента. Для оценки предельного значения выделяемого суммарного теплового потока осуществляется стационарный расчет.

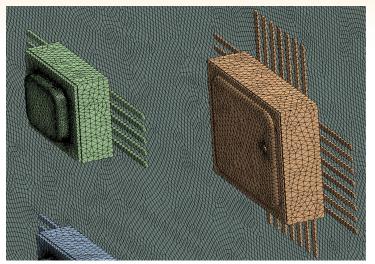


Рис. 2. Фрагмент расчетной сетки геометрической трехмерной модели

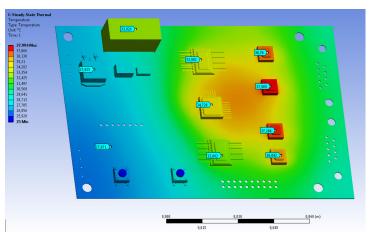


Рис. За. Распределение температуры на плате (вид сверху)

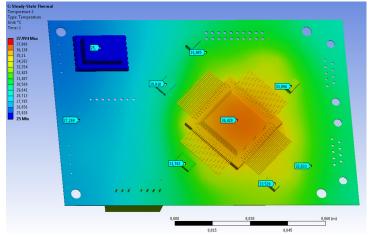


Рис. 36. Распределение температуры на плате (вид снизу)

# No3(45)201

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

#### Таблина 1

L						
	Название	Плотность, $\kappa \Gamma / M^3$		Соэффициен оводности, <u>І</u>	Удельная теплоемкость,	
	материала	KI/M <sup>3</sup>	Ось Х	Ось Ү	Ось Z	<u>Дж</u> /(кг °С)
	стеклотекстолит	2207,7	17,12	17,12	0,196	771,11
	нитрид кремния	2400		16	691	

Распределения температуры на плате (виды сверху и снизу) с указанием точного значения температуры в отдельных точках, полученные в результате стационарного теплового расчета, представлены на *рисунках 3а, 36*.

В результате данного расчета найдено, что предельный суммарный тепловой поток, выделяемый при эксплуатации модуля электронного устройства, не превысит значения 0,75 Вт. Показано, что максимальная температура нагрева 38°С достигается на микроконтроллере (рисунок 36) и интегральных микросхемах (рисунок 3a); приемопередатчики нагреваются до 35°С; импульсный блок питания – до 33°С; диод – до 28°С; собственно плата под микроконтроллером – до 36°С (рисунок 3a).

#### Выводы

С помощью профессионального конечно-элементного пакета программ Ansys Workbench (бесплатно доступная версия Free Ansys Student) осуществлено вычислительное моделирование теплового взаимодействия элементов РЭА, рас-

положенных на отдельной печатной плате. Данные расчеты позволяют сделать вывод о тепловых режимах работающих компонентов РЭА на плате, оценить общее тепловыделение изделия на этапе конструирования. Результаты проведенного стационарного теплового расчета: распределение температур на плате и значение суммарного теплового потока, выделяемого изделием, – согласуются с экспериментальными данными, полученными при испытаниях модуля электронного устройства в лаборатории.

- 1. Баканов Г.Ф. Основы конструирования и технологии радиоэлектронных средств: учебное пособие. СПБ.: Академия, 2007. 368 с.
- 2. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре: Учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1984. 247 с.
- 3. Электронный ресурс www.cfd-blog.ru. Раздел Электроника. Тепловой анализ печатных плат в ANSYS Icepak. 12 декабря 2014 г. Опубликовал Д. Хитрых.





УДК 621.391, 621.397

# УЧЕТ СУЩЕСТВОВАНИЯ СЕТИ ПИЦА КАК НОВЫЙ ПУТЬ К ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ ЦЕЛЕЙ

ACCOUNTING THE PUETZ'S NETWORK EXISTENCE IS A NEW WAY TO IMPROVING EFFICIENCY OF TARGET RECOGNITION



## Валерий Александрович Коломбет

кандидат физико-математических наук заведующий лабораторией

Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН Адрес: 142290, Московская обл., г. Пущино, ул. Институтская, д. 3 Тел.: +7 (4967) 73-94-64 E-mail: kolombet@iteb.ru

#### Вадим Николаевич Лесных

младший научный сотрудник Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН Адрес: 142290, Московская обл., г. Пущино, ул. Институтская, д. 3 Тел.: +7 (4967) 73-94-64

### 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

#### Аннотация

Статья посвящена предсказанию нового способа повышения эффективности детектирования целей. Обнаружение универсальной системы утраивающихся периодов (УСУП) в физических и биологических явлениях привело к выявлению настройки на частоты УСУП всех пяти фоточувствительных систем человеческого глаза. Обнаружение УСУП в технических системах ведет, далее, к идее создания технического аналога глаза, работающего на принципе УСУП в других частотных диапазонах. Это типичный пример бионики – применения знаний о живой природе для решения инженерных задач.

**Ключевые слова:** удвоение периода, утроение периода, биоритмы, периоды в технических системах, формула Пица, родопсин, йодопсин, меланопсин, максимумы поглощения, глаз человека, сеть Пица, окна прозрачности, распознавание целей.

#### Summary

The article is devoted to the prediction of a new method for increasing the effectiveness of target detection. The finding of a universal period-tripling system (UPTS) in physical and biological phenomena led to the revealing of a tuning to the UPTS's frequencies of all five light detecting systems of human eye. The detection of UPTS in technical systems leads, further, to the idea of making a technical analogue of the eye, operating on the UPTS's principle in other frequency ranges. This is a typical example of bionics – the application of knowledge about living phenomena to solution of engineering tasks.

**Keywords:** period doubling, period tripling, biorhythms, periods in technical systems, Puetz's formula, rhodopsin, iodopsins, melanopsin, absorption maxima, human eye, Puetz's network, atmospheric transparency windows, target recognition.

Каскады универсальной системы удваивающихся и утраивающихся периодов (УСУП) связаны в теории динамических систем с именами М. Фейгенбаума и, соответственно, А.И. Гольберга, Я.Г. Синая, К.М. Ханина (ГСХ) [1, 2]. Большую работу в области феноменологии каскадов удваивающихся периодов выполнил Рей Томес (Новая Зеландия) [3]. Феноменологические особенности каскадов утроения были описаны несколько позже. В СССР и Германии феноменологией утраивающихся периодов занимался

Хартмут Мюллер [4], а в США Стивен Пиц с единомышленниками [5]. Мы примкнули к направлению, созданному С. Пицем. Максимум достижений С. Пица приходится на область длинных периодов – в основном это периоды от десятков лет до миллионов и даже миллиарда лет. Статья [6] была нашим первым шагом на пути расширения изучаемой С. Пицем с коллегами области утраивающихся периодов в область коротких периодов, т.е. высоких частот. Мы показали, что не только астрофизические, физические,

геофизические и биофизические длиннопериодные феномены различной природы демонстрируют утроение периодов, подчиняющееся формуле Пица

$$T_{n,k} = 114.6*3^k/n$$
 net,

где целочисленный параметр k располагается в диапазоне, по крайней мере, от 0 до +15, а  $n\!=\!1$  и 2, но и добавили к ним явления, происходящие в мозге человека (частоты, на которых работает память) и в слуховом аппарате человека (слуховой диапазон и музыкальные ноты), рисунок 1.

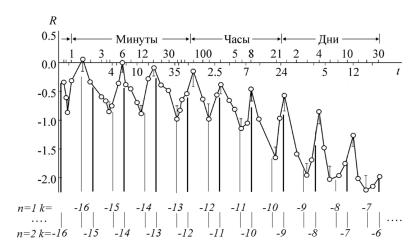


Рис. 1. Пример проявления частот УСУП в механизме памяти человека. На рисунке представлены обнаруженные сотрудником Института биологической физики АН СССР А.Т. Бондарем осцилляции эффективности воспроизведения запомненной информации (ось ординат; условные единицы) с ростом интервала времени (ось абсцисс; интервал времени между моментами запоминания и воспроизведения информации). В нижней части рисунка приведен соответствующий фрагмент УСУП [6]. Каждый всплеск качества памяти связан с периодом Пица при n=2, а каждое «помрачение» памяти – с периодом при n=1.

Смещая область исследуемых биофизических УСУП-феноменов в сторону явлений, находящихся на стыке биологии и техники, мы изучили, например, такое мультимасштабное устройство как фортепиано и нашли здесь нетривиальную настройку на УСУП [6, 7]. Следом за этим были исследованы приборы для УВЧ-терапии и диатермии: оказалось, что они работают на частотах, предсказываемых формулой Пица [8]. К этому моменту уже накопилось достаточно оснований для предположения, что та же система частот Пица будет обнаружена даже в чисто технических системах. И действительно, оказалось, например, что частоты современных компьютерных процессоров тяготеют к частотам Пица, а частоты мобильной телефонии и каналов телевещания, наоборот, избегают частот Пица [9-11]. Таким образом, закону Пица одинаково подчиняются как природные, так и технические эволюционирующие системы.

Известно, что самые важные открытия связаны с обнаружением «правил запрета»: нельзя двигаться быстрее скорости света, два фермиона не могут находиться в одном квантовом состоянии, нельзя измерить точнее, чем это позволяет принцип неопределенности и т.п. Теперь мы уже можем утверждать, что хотя можно конструировать технические системы, выбирая частоты, какие заблаго-

рассудится, но в ходе технологической конкурентной эволюции выиграют, в конце концов, те системы, частоты которых предсказываются формулой Пица.

Естественно, что дальше встает ряд актуальных вопросов, в том числе вопрос о физической природе частот Пица. Мы приблизились к решению этого вопроса, обратив должное внимание, во-первых, на то, что в масштаб возраста вселенной помещается 128, т.е.  $2^7$  утроений планковского времени, и, вовторых, что по необходимости (для улучшения соответствия наблюдаемым данным) параметр п в формуле Пица и нами и Пицем уже трансформирован к виду  $2^m$ , где m – ноль или небольшое натуральное число.

Яркое проявление на рисунке 1 состояний только с m=0 и m=1 свидетельствует о достаточно быстром снижении с ростом параметра m роли частот Пица в механизме памяти человека.

Формула Пица в результате усовершенствования стала заметно проще и физичнее:

$$(Tn,k/T_0) = 3^k/2^m,$$

где  $T_0$ =114,6 лет.

Таким образом, периоды Пица оказались на стыке каскадов удвоения Фейгенбаума-Томеса и каскадов утроения ГСХ-Мюллера-Пица. Если, далее,  $2^7$  утроений периода во вселенной – это не случайность, то можно потребовать, чтобы и  $2^6$  утроений, а также,  $2^5$ ,  $2^4$  и т.д. утроений оказались особыми временами в эволюции вселенной. Мы нашли, что это, действительно, так. Например,  $2^6$  утроениям планковского времени соответствует частота микроволнового реликтового фона,  $2^5$  утроениям – частица Хиггса, а  $2^4$  утроениям соответствует момент конца космологической инфляции и начала перехода в фазу Боль-



шого взрыва. Итак, физическая природа существования набора частот УСУП в форме сети Пица начинает постепенно проясняться [12].

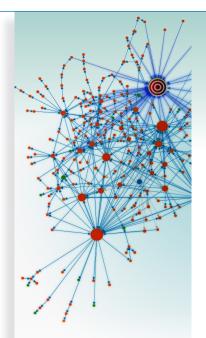
Мы подтвердили необходимость использования уточненной формулы Пица в биологических системах при описании инфрадианных (многодневных) биоритмов различных биохимических и физиологических параметров человека и животных, а также при описании устройства зрения человека. Частота главного (ахроматического) зрения человека (пигмент родопсин) настроена на главную (единственную с нулевым параметром m) для оптического диапазона частоту Пица; все три частоты цветного зрения человека (пигменты йодопсины) тоже настроены на частоты Пица; частота, на которую настроены фоточувствительные нервные клетки сетчатки глаза человека (пигмент меланопсин), тоже оказалась одной из частот Пица - так в итоге сложилась общая картина предельно отлаженного биологической эволюцией механизма распознавания целей зрением человека в оптическом диапазоне, исходно обусловленном окном прозрачности земной атмосферы. В этом случае обнаруживаются частоты Пица с параметрами m в диапазоне 0-11. Интегрируя эти достижения в единую картину, мы пришли к понятию «сеть Пица»: частоты Пица  $T_{k,m}$ в координатах «логарифм частоты – параметр m» выглядят узлами равномерной сетки.

Этот результат получен при исследовании зрения человека, но он кажется вполне применимым для решения задачи повышения эффективности функционирования различных информационноизмерительных комплексов: новый подход позволяет решенную биологией задачу переформулировать уже для наилучшего распознавания современными техническими системами техногенных и естественных космических целей через соответствующие окна прозрачности атмосферы. Развивая эту тему, мы планируем изучить сети Пица в окнах прозрачности атмосферы в различных частотных диапазонах и сформулировать точные рекомендации по использованию полученных результатов с целью повышения эффективности функционирования различных технических систем.

- 1. Feigenbaum M. Quantitative universality for a class of nonlinear transformations. J. Stat. Phys. 1978, 19, p. 25-52.
  - 2. Гольберг А.И., Синай Я.Г., Ханин К.М. Уни-

- версальные свойства для последовательностей бифуркаций утроения периода // Успехи математических наук, 1983. Вып. 1(229). С.159-160.
- 3. http://cyclesresearchinstitute.org/subjects/cycles-astronomy/
- 4. Muller H. Fractal scaling models of resonant oscillations in chain systems of harmonic oscillators // Progress in physics. 2009. 2. P. 72-76.
- 5. Puetz Stephen J., Prokoph Andreas, Glenn Borchardt, Mason Edward W. Evidence of synchronous, decadal to billion year cycles in geological, genetic, and astronomical events // Chaos, Solitons & Fractals. 2014. 62-63. P. 55-75.
- 6. Бондарь А.Т., Федоров М.В., Коломбет В.А. Утраивающиеся периоды в мультимасштабных физических и биологических явлениях // Биофизика, 2015. Вып. 60(6). С. 1208-1215.
- 7. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В. О перспективе применения фундаментальной системы утраивающихся периодов в мультимасштабных технических устройствах // Известия Института инженерной физики, 2016. №1(39). С. 8-11.
- 8. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Скавуляк А.Н., Коломбет Е.В., Бондарь А.Т. Проявление универсальной системы утраивающихся периодов в УВЧ-терапии. // Известия Института инженерной физики, 2017. №2(44). С.70-73.
- 9. Коломбет В.А., Коломбет Е.В., Лесных В.Н. Предсказание тактовой частоты процессора будущего поколения компьютеров как пример эффективности использования в технике свойств фрактальной системы утраивающихся периодов // Известия Института инженерной физики, 2016. №2(40). С. 55-58.
- 10. 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. Вып. 61(3). С. 615-624.
- 11. Коломбет Е.В., Лесных В.Н., Коломбет В.А. Особенности проявления фрактальной системы утраивающихся периодов в телевещании и мобильной телефонии // Известия Института инженерной физики, 2016, №4(42). С.20-24.
- 12. Коломбет В.А., Лесных В.Н. Универсальная система утраивающихся периодов как возможный индикатор дробления времени, сопровождающего эволюцию Вселенной // Материалы конференции «Физика пространства и времени». Муром. Научный городок «Премиловы горы».23-28 марта 2017. С. 17-20.





УДК 355.58, 351.862.1

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ ОПОВЕЩЕНИЯ ОРГАНОВ УПРАВЛЕНИЯ METHODOLOGY OF THE RATIONAL BUILDING OF THE ORGANIZATIONAL-TECHNICAL STRUCTURE OF THE ALERT MANAGEMENT SYSTEM

#### Саят Тулегенович Батталов

адъюнкт кафедры инфокоммуникационных технологий и систем связи

Академия гражданской защиты МЧС России Адрес: 141435, Московская область, г. Химки, мкр-н Новогорск, ул. Соколовская, д. 1

Тел.: +7(498)699-04-42

#### Аннотация

В статье предложена и рассмотрена методика организации топологии системы оповещения служб гражданской защиты. Методика предполагает ранжирование объектов по степени важности для построения оптимальной структуры графа.

**Ключевые слова:** структурная надежность, вершины графа, ранжирование, система оповещения, службы гражданской защиты.

#### Summary

The article proposes and considers the methodology of organization of the topology of the warning system of the civil protection services of the Republic of Kazakhstan. The technique assumes ranking objects by the degree of importance for constructing the optimal structure of the graph.

**Keywords:** graph top, structural reliability, ranking, warning system, civil protection services.

#### Обоснование актуальности задачи

Решение проблемы защиты населения и окружающей природной среды от чрезвычайных ситуаций техногенного и природного характера, а также угроз военного времени, минимизация их социально-экономических и экологических последствий есть важнейшая задача, без которой невозможно устойчивое функционирование и развитие любой страны.

В настоящее время в Казахстане вопросы регулирования общественных отношении, возникающих в процессе проведения мероприятий по гражданской защите и направленных на предупреждение и ликвидацию чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера и их последствий, с нормативно-правовой точки зрения отражены в законе Республики Казахстан от 11 апреля 2014 года № 188-V «О гражданской защите».

В статье 3 закона «О гражданской защите» в числе основных задач, в части, касающихся экстренного доведения информации, прописано следующее:

- в подпункте 6: «информирование и оповещение населения, органов управления гражданской защиты заблаговременно при наличии прогноза об угрозе возникновения чрезвычайной ситуации и (или) оперативно при возникновении чрезвычайной ситуации»;
- в подпункте 9: «создание, развитие и поддержание в постоянной готовности систем оповещения и связи».

В [3] было показано техническое состояние действующей централизованной системы оповещения населения и органов управления республики (СОН) и обоснованы аргументы для ее модернизации или создание новых СОН, в том числе и локальных систем оповещения на потенциально-опасных объектах, в результате чего обеспечивается повышение качества функционирования и эффективности практического применения СОН, и вследствие этого достигается более высокий уровень безопасности государства в целом.



Население оповещается в целях привлечения его внимания при угрозе возникновения или возникновении чрезвычайных ситуаций с множеством вариантов последующих действии. Это может быть укрытие людей в защитных сооружениях, полная или частичная их эвакуация, причем все зависит от характера чрезвычайных ситуаций или же воздействия поражающих (разрушающих) факторов современных средств поражения. С научно-практической точки зрения решению этих вопросов посвящен ряд работ [2, 3, 5].

Постановка же такой научной задачи, как оптимизация оповещения органов управления гражданской защиты и ее решение не встречается в современных научных публикациях. Однако, по мнению автора, данная задача актуальна по следующим причинам:

- закон декларирует значимость такой задачи, но не содержит подхода к ее решению;
- в режимах повседневной деятельности и повышенной готовности часто необходимо оперативно оповещать службы гражданской защиты для принятия решений в особенности в паводкоопасные, пожароопасные периоды и при других угрозах возникновения презвычайных ситуации без информирования населения для предотвращения панических настроений;
- при возникновении чрезвычайной ситуации, когда необходимо в максимально короткие сроки оповестить службы гражданской защиты, а значит и приступить к ликвидации чрезвычайной ситуации, что крайне важно, например, при обрушении зданий, когда с каждым часом процент вероятности спасенных людей уменьшается;
- при проведении командно-штабных учений на всех уровнях реагирования Государственной системы гражданской защиты (ГСГЗ) и прочее.

Следует отметить, что система оповещения гражданской защиты - совокупность программных и технических средств, обеспечивающих информирование населения и государственных органов об угрозе жизни и здоровью людей, о порядке действий в сложившейся обстановке.

Под органами управления будем понимать службы гражданской защиты, утвержденные постановлением правительства Республики Казахстан от 19 ноября 2014 года № 1210 «Об утверждении перечня республиканских служб гражданской защиты». Их количество может доходить до 15 служб в зависимости от области Казахстана и характерных ей чрезвычайных ситуаций. Службы структурно состоят из органов управления исполнительной власти и различных организа-

ций, расположенных на административно-территориальной единице республики.

Для гарантированного доведения необходимой информации службам гражданской защиты необходимо повышать надежность системы оповещения в целом и направлений оповещения в частности, но максимально одинаково повысить ее для всех служб ГСГЗ весьма затратно. Исходя из этого, в данном исследовании предлагается оригинальная методика рационального построения организационно-технической структуры системы оповещения органов управления по критерию «стоимость – структурная надежность». При этом структура такой системы оповещения отображается топологией соответствующей ей сети связи, при этом территориальные службы есть ее узлы, а направления-линии связи. В последующем такая сеть связи отображается адекватным ей графом.

#### Исходные данные и постановка задачи

Для анализа надежности сетей связи наиболее распространенной математической моделью является случайный граф [4, 11, 12]. Его структурные элементы (вершины и ребра) присутствуют в графе с некоторыми вероятностями. Отсутствие какого-либо элемента графа моделирует неработоспособность соответствующего элемента сети связи (узла или линии). Поэтому в качестве вероятностей существования элементов графа обычно берутся значения коэффициентов готовности элементов сети. Как правило, предполагается, что различные элементы существуют независимо друг от друга.

В теории графов существует инструмент построения оптимальной структуры сети для взвешенных неориентированных графов, называемый алгоритмом Прима [6]. Он позволяет найти такое поддерево графа, которое бы соединяло все его вершины, и при этом обладало наименьшим возможным весом. Отметим, что поддерево – это набор ребер, соединяющих все вершины, причем из любой вершины можно добраться до любой другой ровно одним простым путем.

Вербальная постановка рассматриваемой задачи состоит в следующем. Дан связный неориентированный граф G с вершинами vi, i=1,2,3...n и ребрами, соединяющими эти вершины lij,  $i\neq j$ . Задача состоит в нахождении такого связного ациклического поддерева графа

#### T **c** G,

содержащего все его вершины, что суммарный вес его ребер будет минимален. Математическая постановка данной задачи имеет следующий вид:



Найти

$$L_{ij}^{0} = \min L_{ij} = \min \{l_i + l_{i+1}^{0}\}; i = 1, 2, 3....j,$$

при следующих ограничениях:

$$i \neq j$$
,  $i < j$ 

При этом,

 $L^0_{ij}$  – длина оптимального пути из вершины vi к вершине  $v_j$ ;

 $L_{ij}$  – длина пути из вершины  $v_i$  к вершине  $v_j$ ;  $l_i$  – приращение пути из вершины  $v_i$  в вершину  $v_{i+1}$ ;

 $l_{i+1}^0$  — кратчайший маршрут из вершины  $v_{i+1}$  к вершине  $v_i$ .

## Решение задачи. Полученные результаты

Вес ребер исходного графа определим по их расстояниям между вершинами, которые и определяют стоимость сети. Для создания оптимальной структуры сети по правилам алгоритма Прима не требуется знать вес вершин графа. Определение начальной вершины и выбор между равными по весу ребрами для нахождения поддерева графа делается произвольно. В настоящем исследовании этот выбор важен в связи с тем что, далеко не всегда есть необходимость задействования всех служб при предупреждении и ликвидации той или иной чрезвычайной ситуации. Есть службы, которые задействуются чаще, чем другие. Например, служба охраны общественного порядка, непривлечение которой маловероятно или служба торговли и питания, которая привлекается в основном при эвакуационных мероприятиях. Поэтому в данной задаче необходимо определить значения весовых коэффициентов вершин графа.

Для определения значения весовых коэффициентов вершин графа был применен метод экспертных оценок, при этом была собрана группа экспертов в области гражданской защиты, имеющих высшее профильное образование и стаж работы по профилю не менее 5 лет [8]. Однородность состава экспертной группы подтверждена коэффициентом ранговой корреляции Кендалла [9], который составляет для нашего случая величину 0,71.

Обработка экспертных данных проводилась методом анализа иерархий (МАИ) [10], который позволил определить степени влияния служб на общую готовность ГСГЗ в целом к выполнению поставленных задач.

Для фиксации результата сравнения пары альтернатив использовалась шкала относительной важности, принятая в МАИ.

Для наглядности в рамках задачи определим 10 служб ГСГЗ: В, С, D, E, H, F, K, L, P, M, которые будут иметь определенные задачи и функции.

Согласно МАИ результат парных сравнений записывается в виде обратно симметричной матрицы, размерность которой определяется количеством сравниваемых альтернатив. МАИ позволяет получить вектор весовых коэффициентов соответствующей размерности. При этом для каждого эксперта строится своя матрица сравнений. Для рассматриваемого случая результаты сравнения представлены в таблице 1.

**Таблица 1** Попарное сравнение служб

	В	C	D	E	н	F	K	L	P	M	Приоритет	Bec
В	1	1	1	0,5	0,5	0,33	0,33	0,20	0,14	0,14	13,38	10
C	1	1	1	1	0,5	0,5	0,33	0,33	0,33	0,33	11,95	8
D	1	1	1	1	1	0,5	0,5	0,33	0,25	0,20	12,77	9
E	2	1	1	1	1	1	1	1	0,5	0,33	11,83	7
Н	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	10,30	3
F	3	2	2	1	1	1	1	1	1	1	10,20	2
K	3	3	2	1	1	1	1	1	1	1	10,20	2
L	5	3	3	1	1	1	1	1	1	1	10,35	4
P	7	3	4	2	1	1	1	1	1	1	10,79	5
M	7	3	5	3	1	1	1	1	1	1	11,26	6
Индекс согласованности											0,05	
	(	Этн	оше	ение	согла	сован	ности				0,03	

Итак, определив веса ребер и вершин графа и зная центр оповещения (вершина А) и пункты оповещения (вершины В, С, D, Е, Н, F, K, L, Р, М), можно их представить в виде исходного графа G. Подчеркнем, что под направлениями оповещения искомой сети связи будем понимать ребра графа, а числа возле них показывают их веса, которые интерпретируются как расстояния между вершинами графа.

По правилам алгоритма Прима сначала берется произвольная вершина и находится ребро, инцидентное данной вершине и обладающее наименьшей стоимостью. Найденное ребро и соединяемые им две вершины образуют дерево. Затем рассматриваются ребра графа, один конец которых – уже принадлежащая дереву вершина, а другой – нет; из этих ребер выбирается ребро, не создающее цикла и обладающее наименьшей стоимостью. Выбираемое на каждом шаге ребро присоединяется к дереву. Рост дерева происходит до тех пор, пока не будут исчерпаны все вершины исходного графа. Результатом совокупности приращений графа является поддерево минимального веса. Пошаговые операции алгоритма Прима над данным графом представлены в таблице 2, при этом для его реализации потребовалось осуществить 12 шагов.

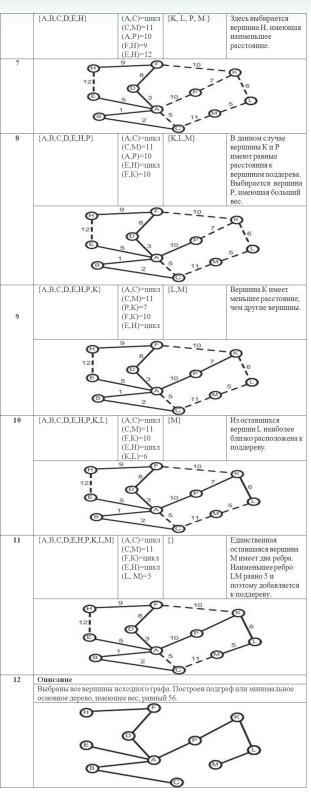


# Ne3 (45) 2017

# РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

**Таблица 2**Шаговое преобразование графа по алгоритму Прима

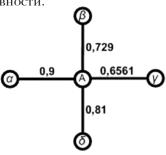
№ шага	Множество выбранных вершин v	<b>Ребра</b> <i>l</i>	Множество невыбранных вершин v/l	Описание
	8		{A, B, C, D, E, H, F, K, L, P, M}	Исходный взвешенный неориентированный граф.
1	G~ <sub>7</sub> (E)	- 3 - 3 - 3 - 3 - 3 - 3 - 3 - 3 - 3 - 3	2 - 10 - 7 · 6 · 6 · 6 · 6 · 6 · 6 · 6 · 6 · 6 ·	\$\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\
2	(A)	(A,B)=1 (A,C)=5 (A,P)=10 (A,D)=3 (A,E)=5	{C, D, E, H, F, K, L, P, M}	Выбираем начальную вершину А, которая является истоковой. С вершиной А соединены ребрами вершины В, С, Р, D, Е. Вершина В ближайшая к А и выбирается как вторая вершина вместе с ребром АВ.
	121 E	9 P	10,0	P ,, D
3	{A, B}	(B,C)=2 (A,C)=5 (A,P)=10 (A,D)=3 (A,E)=5	{D, E, H, F, K, L, P, M}	К вершинам А и В бликайшими вершинами являются вершиныС, Р, D, Е. Вершина С бликайшая к ним и поэтому включается в поддерево.
	12 I 10 \ 0 \	9	10,00	® (6)
4	{A, B, C}	(A,C)=цикл (C,M)=11 (A, P)=10 (A,D)=3 (A,E)=5	{E, H, F, K, L, P,M}	Аналогичным способом выбирается вершина D, так как у нее наименьшее расстояние к A.
	(F)	5 3 1 2	10 Ø	ه پ
5	{A, B, C, D}	(A,C)=цикл (C,M)=11 (A,P)=10 (D,F)=8 (A,E)=5	{H,F,K,L,P,M}	Далее выбирается вершина Е, имеющая наименьшее расстояние к вершинам поддерева.
	121 120 10	5 3 4 A	10, 0	P \
6	{A, B, C, D, E}	(A,C)=цикл (C,M)=11 (A,P)=10 (D,F)=8 (E,H)=12	{H, K, L, P, M}	В этом случае по аналогии выбирается вершина F.
	12I		7	<b>Q</b> ,,,





Далее необходимо оценить связанность полученной структуры. В соответствии с ГОСТ P53111-2008 «Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки», коэффициент готовности сети передачи данных, который является показателем технической нормы надежности  $p_{\xi}$  сети электросвязи, должен быть не менее 0,99. Отсюда требуемый коэффициент готовности рассматриваемой сети оповещения  $P_{TP}$  должен удовлетворять условию  $P_{TP} \ge 0$ ,99.

Для удобства последующего анализа структуры полученной сети оповещенияусловно представим ее в виде радиальной сети связи счетырьмя направлениями оповещения и присвоим им буквенные обозначения: А-Е ( $\alpha$ ); А-D, F, H ( $\beta$ ); А-P, K, L, M ( $\gamma$ ) и А-B, C ( $\delta$ ), рисунок 1. Каждому направлению оповещения присвоен свой коэффициент готовности.



**Рис. 1.** Модель радиальной сети с четырьмя направлениями оповещения

Для упрощения расчетов примем, чтовершины графа абсолютно надежны, авероятности существования егоребер равны значениям, показанным на рисунке 1. Тогда по формулам последовательно-параллельного соединения [5] значение связности полученного графа будет равно P=0,3487. При этом полученное значение P<PTP, что не соответствует заявленному ограничению, вытекающему из требований ГОСТ.

При построении современных иерархических систем оповещения, управления, связи, энергетики и др. используется сетецентрический принцип, практическая реализация которого представляется в виде радиально-кольцевых сетей или сетецентрических систем управления [7].

Основными достоинствами сетецентрического принципа построения систем управления является существенное повышение связности между управляющим центром и некоторым подмножеством подчиненных пунктов, за счет кольцевых (рокадных) путей связи, которые обеспечивают повышение связности между вершинами сети [3, 11, 12].

На *рисунке* 2 показано преобразование рассматриваемой радиальной сети в радиальнокольцевую сеть, состоящую из 4-х радиальных ребер тр. (тр.)

ребер  $L^p = \left\{l_{\xi=\overline{1,4}}^p\right\}$  и 4-х кольцевых ребер  $L^k = \left\{l_{\xi=\overline{5,8}}^k\right\}$  .

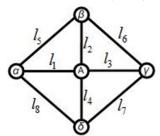


Рис. 2. Модель радиально-кольцевой сети

Анализ связности вершины A с вершинами направлении оповещения α, β, γ и δ проведен на основе применения метода полного разложения мостиковых соединений [2] и сводится к последовательному выполнению следующих аналитических операций.

Вначале определим число состояний кольцевых ребер, которое равно  $\Gamma$  = 24 = 16, в том числе:

$$\begin{cases} \Gamma_{1} = I_{5} \cdot I_{6} \cdot I_{7} \cdot I_{8}; \ \Gamma_{2} = \overline{I_{5}} \cdot I_{6} \cdot I_{7} \cdot I_{8}; \ \Gamma_{3} = I_{5} \cdot \overline{I_{6}} \cdot I_{7} \cdot I_{8}; \ \Gamma_{4} = I_{5} \cdot I_{6} \cdot \overline{I_{7}} \cdot I_{8}; \\ \Gamma_{5} = I_{5} \cdot I_{6} \cdot I_{7} \cdot \overline{I_{8}}; \ \Gamma_{6} = \overline{I_{5}} \cdot \overline{I_{6}} \cdot I_{7} \cdot I_{8}; \ \Gamma_{7} = \overline{I_{5}} \cdot I_{6} \cdot \overline{I_{7}} \cdot I_{8}; \ \Gamma_{8} = \overline{I_{5}} \cdot I_{6} \cdot I_{7} \cdot \overline{I_{8}}; \\ \Gamma_{9} = I_{5} \cdot \overline{I_{6}} \cdot \overline{I_{7}} \cdot I_{8}; \ \Gamma_{10} = I_{5} \cdot \overline{I_{6}} \cdot I_{7} \cdot \overline{I_{8}}; \ \Gamma_{11} = I_{5} \cdot I_{6} \cdot \overline{I_{7}} \cdot \overline{I_{8}}; \ \Gamma_{12} = \overline{I_{5}} \cdot \overline{I_{6}} \cdot \overline{I_{7}} \cdot I_{8}; \\ \Gamma_{13} = \overline{I_{5}} \cdot \overline{I_{6}} \cdot I_{7} \cdot \overline{I_{8}}; \ \Gamma_{14} = \overline{I_{5}} \cdot I_{6} \cdot \overline{I_{7}} \cdot \overline{I_{8}}; \ \Gamma_{15} = I_{5} \cdot \overline{I_{6}} \cdot \overline{I_{7}} \cdot \overline{I_{8}}; \ \Gamma_{16} = \overline{I_{5}} \cdot \overline{I_{6}} \cdot \overline{I_{7}} \cdot \overline{I_{8}}; \end{cases}$$

(1) ep (1)

Затем с учетом состояний кольцевых ребер (1) выразим событие Е связности центра оповещения с пунктами оповещения следующим образом:

$$E = \sum_{i=1}^{16} \Gamma_i \cdot G_i \tag{2}$$

 $Gi=G/\Gamma i-i$ -й условный случайный граф, полученный в результате преобразования исходного графа (рисунок 2) в соответствии с состояниями (1) его кольцевых ребер  $L^k=\left\{l_{\mathcal{E}=\overline{5\,8}}^k\right\}$  .

Согласно гипотез (1) событие связности (2) выразим в следующем виде:

$$\begin{split} E &= (l_5 \cdot l_6 \cdot l_7 \cdot l_8)_{i=1} \cdot \overline{\overline{l_1} \cdot \overline{l_2} \cdot \overline{l_3} \cdot \overline{l_4}} + (\overline{l_5} \cdot l_6 \cdot l_7 \cdot l_8)_{i=2} \cdot \overline{\overline{l_1} \cdot \overline{l_2} \cdot \overline{l_3} \cdot \overline{l_4}} + \\ &+ (l_5 \cdot \overline{l_6} \cdot l_7 \cdot l_8)_{i=3} \cdot \overline{\overline{l_1} \cdot \overline{l_2} \cdot \overline{l_3} \cdot \overline{l_4}} + (l_5 \cdot l_6 \cdot \overline{l_7} \cdot l_8)_{i=4} \cdot \overline{\overline{l_1} \cdot \overline{l_2} \cdot \overline{l_3} \cdot \overline{l_4}} + \\ &+ (l_5 \cdot l_6 \cdot l_7 \cdot \overline{l_8})_{i=5} \cdot \overline{\overline{l_1} \cdot \overline{l_2} \cdot \overline{l_3} \cdot \overline{l_4}} + (\overline{l_5} \cdot l_6 \cdot l_7 \cdot \overline{l_8})_{i=8} \cdot \overline{l_1} + (l_5 \cdot \overline{l_6} \cdot \overline{l_7} \cdot \overline{l_8})_{i=9} \cdot \overline{\overline{l_1} \cdot \overline{l_2} \cdot \overline{l_4}} + \\ &+ (\overline{l_5} \cdot l_6 \cdot \overline{l_7} \cdot \overline{l_8})_{i=10} \cdot \overline{\overline{l_1} \cdot \overline{l_2}} + (\overline{l_5} \cdot l_6 \cdot \overline{l_7} \cdot \overline{l_8})_{i=11} \cdot \overline{\overline{l_1} \cdot \overline{l_2} \cdot \overline{l_3}} + (\overline{l_5} \cdot \overline{l_6} \cdot \overline{l_7} \cdot \overline{l_8})_{i=12} \cdot \overline{\overline{l_1} \cdot \overline{l_2}} + \\ &+ (l_5 \cdot \overline{l_6} \cdot l_7 \cdot \overline{l_8})_{i=13} \cdot \overline{l_1} + (\overline{l_5} \cdot l_6 \cdot \overline{l_7} \cdot \overline{l_8})_{i=14} \cdot \overline{l_1} + (l_5 \cdot \overline{l_6} \cdot \overline{l_7} \cdot \overline{l_8})_{i=15} \cdot \overline{\overline{l_1} \cdot \overline{l_2}} + \\ &+ (\overline{l_5} \cdot \overline{l_6} \cdot \overline{l_7} \cdot \overline{l_8})_{i=16} \cdot \overline{l_1}. \end{split}$$



В соответствии с выражением (3) определим полную вероятность связности Р анализируемой сети в следующем виде:

$$\begin{split} P = & (p_5 \cdot p_6 \cdot p_7 \cdot p_8) \cdot (1 - \overline{q_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot q_4}) + (q_5 \cdot p_6 \cdot p_7 \cdot p_8) \cdot \\ & \cdot (1 - \overline{q_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot q_4}) + (p_5 \cdot q_6 \cdot p_7 \cdot p_8) \cdot (1 - \overline{q_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot q_4}) + \\ & + (p_5 \cdot p_6 \cdot q_7 \cdot p_8) \cdot (1 - \overline{q_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot q_4}) + (p_5 \cdot p_6 \cdot p_7 \cdot q_8) \cdot \\ & \cdot (1 - \overline{q_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot q_4}) + (q_5 \cdot q_6 \cdot p_7 \cdot p_8) \cdot (1 - \overline{q_1 \cdot q_3 \cdot q_4}) + \\ & + (q_5 \cdot p_6 \cdot q_7 \cdot p_8) \cdot (1 - \overline{q_1 \cdot q_4}) + (q_5 \cdot p_6 \cdot p_7 \cdot q_8) \cdot p_1 + (p_5 \cdot q_6 \cdot q_7 \cdot p_8) \cdot (4) \\ & \cdot (1 - \overline{q_1 \cdot q_2 \cdot q_4}) + (p_5 \cdot q_6 \cdot p_7 \cdot q_8) \cdot (1 - \overline{q_1 \cdot q_2}) + (p_5 \cdot p_6 \cdot q_7 \cdot q_8) \cdot \\ & \cdot (1 - \overline{q_1 \cdot q_2 \cdot q_3}) + (q_5 \cdot q_6 \cdot q_7 \cdot p_8) \cdot (1 - \overline{q_1 \cdot q_4}) + (q_5 \cdot q_6 \cdot p_7 \cdot q_8) \cdot p_1 + \\ & \cdot (q_5 \cdot p_6 \cdot q_7 \cdot q_8) \cdot p_1 + (p_5 \cdot q_6 \cdot q_7 \cdot q_8) \cdot (1 - \overline{q_1 \cdot q_2}) + (q_5 \cdot q_6 \cdot q_7 \cdot q_8) \cdot p_1. \end{split}$$

Если принять, что связность вновь введенных кольцевых ребер  $L^k = \{l_{\xi=\overline{5,8}}^k\}$  одинакова и

составляет величину p=0,9, то согласно формуле (4) общая связность полученной радиальнокольцевой сети будет P=0,994.

Таким образом, в результате проведенного синтеза связность модернизированной структуры стала больше требуемой величины, поэтому можно считать, что построение рациональ-

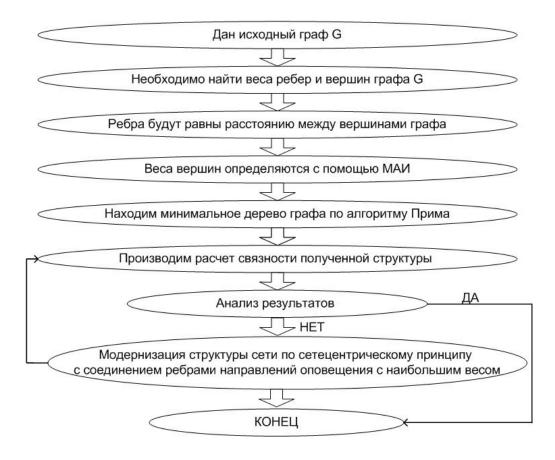
ной организационно-технической структуры рассматриваемой системы оповещения органов управления завершено.

Полученный результат подтверждает вывод о том, что применение сетецентрического принципа значительно повышает вероятность связности сети при введении в нее минимального количества дополнительных ребер.

Совокупность всех описанных этапов построения рациональной структуры сети оповещения в виде блок-схемы представлена на рисунке 3.

#### Выводы

- 1. Показано, что сетецентрический принцип организационно-технического построения системы оповещения существенно повышает связность центра оповещения с подчиненными пунктами оповещения относительно существующих радиальных структур.
- 2. Полученный численный результат подтверждает справедливость предложенной методики, а также возможность создания систем оповещения с достаточно высокой готовностью к практическому применению, близкой к единице.



**Рис. 3.** Блок-схема методики построения рациональной организационно-технической структуры системы оповещения органов управления



- 3. Предложенная методика построения сетевых структур по критерию «стоимость структурная надежность» может применяться для построения систем связи различного профиля и назначения.
- 4. В дальнейшем на синтезированной структуре системы оповещения можно реализовывать доставку целевых сообщений на базе типовых протоколов информационного обмена. При этом найденный коэффициент связности будет входить в качестве основного параметра при определении вероятностно-временных характеристик доставки сообщений [13-15].

- 1. Сапрыкин Д.Н., Осипов А.М., Ларионова М.Д. Основы безопасности жизнедеятельности в условиях современного производства. Иваново, 2005. 191 с.
- 2. Носов М.В. Комбинаторные методы анализа качества функционирования и модернизации систем оповещения населения. Монография: Химки, 2014. 304 с.
- 3. Батталов С.Т. Актуальность оценки надежности систем оповещения населения и основные методики ее реализации // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты // АГЗ МЧС России, 2016. № 4. С. 38-44.
- 4. Филин Б.П. О предельном развязывании кластеров в оценках Полесского границ комбинаторной надежности случайных бинарных систем // Автоматика и телемеханика, 2005. № 9.
- 5. Носов М.В. Метод полного разложения мостиковых соединений в задачах анализа связности радиально-кольцевых структур систем оповещения населения // Технологии гражданской безопасности, 2014. № 4(42). Т. 11. С. 47-56.
- 6. Кормен Т. Х., Лейзерсон Ч. И., Ривест Р. Л., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ, 2-е изд. М.: Вильямс, 2005. 314 с.
- 7. Гадасин В.А., Гадасин Д.В. Надежность двухполюсных сетей с аддитивной структурой // Автоматика и телемеханика, 1999. №10. С. 164.

- 8. Куанышбаев М.С., Добров А.В. Концептуальная модель зонирования территории области по степени пригодности для приема эвакуируемого населения в Казахстане // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты, 2016. №4. С. 66-72.
- 9. Никифоров Г.С., Дмитриева М.А., Снетков В.М. Практикум по психологии менеджмента и профессиональной деятельности: учебное пособие. М.: Речь, 2003. 448 с.
- 10. Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1989. 316 с.
- 11. Цимбал В.А., Климов В.В., Устинов И.А. Оценивание связности базового сегмента информационной сети АСУ с рокадными связями // Информация и космос, 2008. №2. С. 22-25.
- 12. Цимбал В.А., Климов В.В., Устинов И.А. Оценивание связности информационной сети АСУ с рокадными связями на основе связности базового сегмента // Информация и космос, 2008. №3. С. 53-54.
- 13. Цимбал В.А., Косарева Л.Н., Исаева Т.А., Потапов С.Е., Ваганов И.Н. Математическая модель доставки многопакетных сообщений в соединении «точка-точка» на сети передачи данных с процедурой «скользящее окно» // Известия Института инженерной физики, 2009.  $\mathbb{N}_2$  3(13). С. 13-19.
- 14. Цимбал В.А., Тоискин В.Е., Потапов С.Е., Шуточкин Е.А., Бонкин И.Д. Концепция применения программно-конфигурируемых сетей для управления мобильными объектами // Известия Института инженерной физики, 2016. № 1(39). С. 25-30.
- 15. Цимбал В.А., Тоискин В.Е., Хрусталев Р.Н., Гвозд К.И., Яременко Е.А. Задача обоснования канальной емкости направлений системы радиосвязи с незакрепленными каналами в условиях их поражения и восстановления и ее решение // Известия Института инженерной физики, 2016. № 3(41). С. 33-37.



УДК 654.16

# МЕТОДИКА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТОПОЛОГИЕЙ И ТРАФИКОМ В МУЛЬТИСЕРВИСНОЙ ЦИФРОВОЙ СЕТИ РАДИОСВЯЗИ

THE METHOD OF OPTIMAL CONTROL OF TOPOLOGY AND TRAFFIC IN A MULTISERVICE DIGITAL RADIO NETWORK

## Сергей Евгеньевич Потапов

кандидат технических наук, докторант филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)

Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17

Тел.: 8(909)164-71-60 E-mail: 41kaf\_rabota@mail.ru



#### Аннотация

Несмотря на бурно развивающиеся в последнее время технологии построения систем передачи данных, актуальным остается вопрос эффективного использования телекоммуникационных ресурсов сетей связи. Наиболее остро в этом плане выглядит проблема построения радиосетей связи. В связи с этим актуальной является задача эффективного распределения частотных каналов связи между узлами коммутации беспроводной цифровой сети связи. В статье приводится научно-методический подход к решению такой задачи по критерию максимальной пропускной способности сети.

**Ключевые слова:** радиосети, частотный диапазон, пропускная способность, оптимальное распределение.

#### Summary

Despite the rapidly developing technologies in the construction of data transmission systems, the issue of efficient use of telecommunication resources of communication networks remains relevant. The most acute problem in this regard is the problem of constructing radio communication networks. In this connection, the problem of efficient allocation of frequency channels of communication between the nodes of commutation of the wireless digital communication network is actual. The article presents a scientific-methodical approach to solving such a problem by the criterion of the maximum network capacity.

**Keywords:** radio networks, frequency range, throughput, optimal distribution.

Со времен появления первых систем радиосвязи исследователи решают задачу повышения пропускной способности таких систем при ограниченности спектральных и энергетических ресурсов. С появлением технологий беспроводного широкополосного доступа (БШПД) ситуация не изменилась. Вследствие постоянно растущих потребностей населения в передаче информации непрерывно растет объем абонентского информационного трафика, циркулирующего в сетях общего пользования. В настоящее время набирает все большую популярность индустрия мобильного интернета, базирующаяся на сетях радиодоступа и, зачастую, использующая для организации межузловых каналов связи также радиолинии. Поэтому данные сети радиосвязи функционируют в условиях ограниченности частотного диапазона, предоставленного для работы конкретной радиосети в определенной местности. Следовательно, актуальной является задача оптимального использования выделенного спектрального ресурса сети для наиболее эффективного обслуживания ее абонентов при обеспечении заданных требований по качеству информационного обмена.

Рассмотрим произвольный сегмент радиосети передачи данных, представленный на pисунке 1.

Здесь показан вариант объединения разнородных по оборудованию и трафику абонентов посредством радиоканалов и коммутационного оборудования, установленного на радиомачтах.

Зачастую частотный диапазон, выделенный для организации сети доступа, в силу различных технических причин отличается от частот радиосвязи между узлами коммутации, поэтому за-



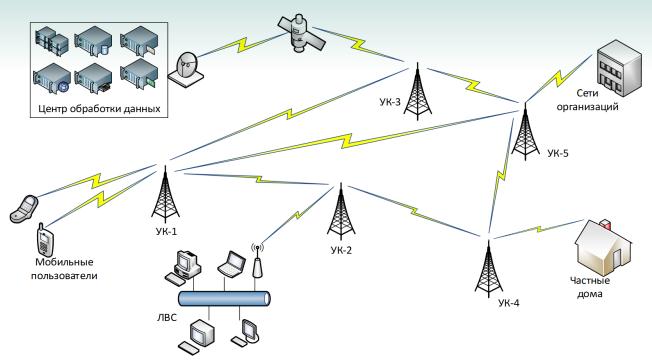


Рис. 1. Сегмент мультисервисной сети радиосвязи общего пользования

дача частотно-территориального планирования сети радиосвязи декомпозируется как минимум на две подзадачи. Это:

- обеспечение доступа абонентам (задача «последней мили»);
- организация радиотрасс между ретрансляторами.

Первой задаче посвящено достаточно большое количество публикаций, и в настоящий момент существующие технологии БШПД достаточно эффективно справляются с данной задачей. Что касается второй задачи, то здесь до недавнего времени было все примитивно. Базовые станции, находясь на определенном удалении друг от друга и используя направленное антенное оборудование, соединялись с ближайшими «соседями», образуя так называемые соты, где не требовалось распределять частотные каналы между направлениями связи.

Однако в последнее время на смену классической модели организации мобильной связи приходят новые технологии. Во-первых, это появление микровышек, расширяющих возможности базовых станций и возникающих стихийно в любых частях населенных пунктов, где назревает в них потребность. Во-вторых, появление мобильных базовых станций для временного или оперативного обеспечения широкополосного доступа абонентам. В-третьих, масштабное освоение труднодоступных районов требует организации беспроводной связи, но ограничивает вариан-

ты географического расположения базовых станций. Поэтому задача выбора эффективной конфигурации радиотрасс между ретрансляционными узлами беспроводной сети с учетом создаваемой абонентской нагрузки и требованиям по надежности, оперативности, связности и энергоэффективности приобретает новые очертания и требует нетривиальных подходов к решению.

Представим задачу распределения частотного ресурса в следующем виде. Имеется совокупность М территориально распределенных узлов коммутации (УК), находящихся под нагрузкой абонентского трафика. Для организации радиоканалов между УК выделена полоса частот  $\Delta F$ . Причем, в соответствии с реализуемой технологией беспроводной связи (БПС) для организации одного цифрового канала необходима полоса частот  $\Delta f$ . При этом в зависимости от дальности, параметров электромагнитной обстановки, условий местности и т.д. скорость передачи информации в таком канале варьируется в определенном диапазоне, определяемом стандартом БПС

$$\overline{v} = \{v_1, v_2, ..., v_r\}$$
.

Предполагая адаптацию коммуникационного оборудования УК к условиям радиолинии и выбора наиболее эффективного режима функционирования радиомодемов, получим в каждом радионаправлении максимальную скорость передачи информации по одному цифровому каналу

$$v_{ii}^* \in \overline{v}$$
,  $i, j = \overline{1, M}$ ;  $i \neq j$ 



Из ограниченности предоставленного частотного диапазона  $\Delta F$  следует, что имеющееся для организации связи число частотных каналов

$$n = \frac{\Delta F}{\Delta f}$$

требуется распределить между направлениями связи таким образом, чтобы добиться наиболее эффективной работы сети при выполнении требований по надежности, связности, оперативности и т.д.

Если говорить об эффективности работы сети, то необходимо в первую очередь сформулировать критерий эффективности, за который можно брать минимум среднего времени доставки пакетов, минимальную стоимость использования каналов, максимальную пропускную способность сети и т.д.

Предположим, что требуется обеспечить максимальную пропускную способность сети при ограничении на связность узлов сети. Тогда, понимая под пропускной способностью сети суммарную пропускную способность в потоковом графе [1] между каждой парой УК, определяемой, например, по методу минимального сечения, получим выражение для целевой функции:

$$S = \sum_{k,l} c_{kl} \rightarrow \max k, l = \overline{1, M}; \quad k \neq l, (1)$$

где  $c_{kl} = F(N, V^*)$  – пропускная способность между абонентами k и l,

N – матрица распределения частотных каналов по направлениям связи.

При ограничениях:

$$\begin{cases} c_{kl} > 0; \\ \sum_{ij} n_{ij} = n, \quad i, j = \overline{1, M}, \quad i \neq j. \end{cases}$$
 (2)

Учитывая, что пропускная способность направлений связи  $c_{ii} = n_{ii} \cdot v_{ii}^*$ , можно обозначить

$$C = \left\| c_{ij} \right\| = \left\| n_{ij} \cdot v_{ij}^* \right\| -$$

матрица пропускных способностей сети, тогда  $c_{kl} = F(C)$ .

Однако в такой постановке, обеспечив выполнение требования по связности построением остова в терминологии теории графов [1], содержащего ветви с максимальными  $v^*$ , максимальную суммарную пропускную способность сети формально можно получить, учитывая линейную зависимость  $c = f(v^*)$ , распределив все оставшиеся n-M+I частотных канала ребрам с максимальной  $v^*$ . Однако практически получаем явный перекос в предоставлении коммуника-

ционных ресурсов между направлениями связи, что в итоге выльется в слабый уровень скорости информационного обмена между большинством УК и простоем пропускной способность на некоторых направлениях.

Обеспечить равномерность распределения коммуникационного ресурса сети можно, переформулировав целевую функцию в следующем виде:

$$S = \min c_{kl} \rightarrow \max k, l = \overline{1, M}; \quad k \neq l$$
 (3)

при ограничениях (2).

Тогда алгоритм решения задачи будет состоять в следующем:

- 1) построить остов полносвязного графа с ветвями максимальной  $v^*$ ;
- 2) определить пару УК с минимальной пропускной способностью;
- 3) распределить очередной частотный канал направлению, обеспечивающему максимальной прирост пропускной способности выше указанной паре УК;
- 4) пересчитать пропускные способности между каждой парой абонентов;
- 5) выполнять пп. 2-4 до исчерпания свободных частотных каналов.

С учетом линейности величины с и выпуклости целевой функции данный алгоритм позволит получить условно оптимальное решение задачи (2). Условность решения определяется предположением о равномерной информационной нагрузке, создаваемой абонентами всех УК сети. Такой способ распределения каналов может быть применен на начальном этапе функционирования сети, когда нет априорных данных об активности абонентов. В случае имеющейся (накопленной) информации о создаваемой на сеть информационной нагрузке в виде матрицы интенсивностей формирования сообщений между каждой парой УК (в литературе встречается термин «матрицы тяготения»), после первоначального распределения цифровых каналов, например, описанным выше способом, необходимо провести перераспределение каналов с учетом анализа сети в следующем виде.

Обеспечить

$$S = \sum_{k,l} (x_{kl}) \to \max k, l = \overline{1, M}; \quad k \neq l,$$
 (4)

где  $x_{kl} = c_{kl} - \lambda_{kl} - kl$ -й элемент матрицы остаточных пропускных способностей (т.е. разница между пропускной способностью направления kl и соответствующим элементом матрицы тяготения  $\Lambda$ ) при ограничениях



$$\begin{cases} c_{kl} = F(C); \\ x_{kl} > 0; \\ \sum_{ij} n_{ij} = n, \quad i, j = \overline{1, M}, \quad i \neq j. \end{cases}$$
 (5)

Решить задачу (4) в ограничениях (5) аналитическим способом затруднительно из-за наличия функционала

$$c_{kl} = F(C). \tag{6}$$

Поэтому, опираясь на выпуклость функции приращения пропускной способности между абонентами k и l

$$\Delta c_{kl}(t) = F^{t}(C) - F^{t-1}(C), \quad t \in \overline{1, M},$$

можно утверждать, что вместо полного перебора вариантов распределения частотных каналов быстрее к решению (если оно существует в указанных ограничениях) приведет следующий алгоритм:

- 1) построить остов полносвязного графа с ветвями максимальной  $v^*$ ;
- 2) определить пару УК kl с минимальным элементом матрицы  $X = \|x_{kl}\|$ ;
- 3) распределить очередной частотный канал направлению ij:  $n_{ij} = n_{ij} + 1$ , обеспечивающему максимальной прирост пропускной способности выше паре УК kl;
  - 4) пересчитать матрицу X;
- 5) выполнять пп. 2-4 до исчерпания свободных частотных каналов.

Полученное первоначальное распределение каналов может не являться допустимым, т.е. могут иметь место отрицательные элементы  $\mathbf{x}_{kl}$ . Однако в силу нелинейности функционала (6) данный факт не означает отсутствие рационального решения. Поэтому дальнейшие шаги алгоритма направлены на перераспределение частотных каналов от профицитных по пропускной способности пар УК к дефицитным:

1) определить пару УК kl с минимальным элементом матрицы

$$X = ||x_{kl}||;$$

- 2) определить ветвь ij с минимальной суммарной пропускной способностью  $\Delta_{\Sigma}^{ij}$  для всех пар УК;
- 3) определить ветвь ab, обеспечивающую максимальной прирост пропускной способности  $\Delta^{ab}_{\Sigma}$  паре УК kl;
- 4) если предыдущее решение являлось допустимым, то сравнить величины  $\Delta_{\Sigma}^{ij}$  и  $\Delta_{\Sigma}^{ab}$  . В слу-

чае, если  $(\Delta_{\Sigma}^{ab} - \Delta_{\Sigma}^{ij} \geq 0)$ , то передать частотный канал от ij к ab. В противном случае – перейти к п. 6, пропустив шаг. Повторять шаги 2-5 до исчерпания ветвей, повышающих целевую функцию;

- 5) если предыдущее решение не являлось допустимым, то проверить, не увеличится ли число отрицательных элементов матрицы ш в случае передачи частотного канала от ij к ab. Если да, то допустимых решений не существует, если нет, то передать частотный канал от ij к ab и перейти к шагу 6;
- 6) при выходе в область допустимых решений повторять шаги 2-5.

Получив распределение частотного ресурса между направлениями связи, обеспечивающее некоторый запас по пропускной способности для каждой пары абонентов, требуется решить задачу распределения информационных потоков по направлениям связи для исключения перегрузки отдельных направлений. При этом в качестве критерия эффективности распределения информационных потоков может выступать минимум среднего времени доведения пакетов по сети

$$\overline{T}_{\partial ocm} = \frac{2}{M(M-1)} \sum_{k=1}^{M} \sum_{l=1}^{M} \overline{t}_{\partial ocm}^{lk} \to \min, \quad k \neq l, (7)$$

$$\tau_{Ae}$$

$$\frac{\tau_{kl}^{kl}}{t_{\partial ocm}} = \frac{1}{\lambda_{kl}} \sum_{i=1}^{M} \lambda_{kl}^{i} \cdot \overset{\cdot}{t_{kl}} \quad - \tag{8}$$

среднее время доведения между k и l абонентом по всем маршрутам;

$$\bar{t}_{kl}^{i} = \sum_{i} \left( t_{osc}^{i} + t_{docm}^{i} \right)^{-} \tag{9}$$

среднее время доведения по l-му маршруту;  $t_{i\,x}^{i}$  – время ожидания в транзитных УК.

Каждый УК находится под воздействием поступающей информационной нагрузки от собственных абонентов, а также вынужден обслуживать транзитные потоки информации. При этом собственные абоненты, получив отказ в предоставлении канала передачи данных, вновь осуществляют попытку доступа, а транзитные пакеты в этом случае ожидают обслуживания. Такую модель удобно представить, как систему массового обслуживания с конечным числом источников и повторением заявок для собственных абонентов и модель с ожиданием для транзитных потоков [2]. Отсюда время ожидания в транзитных узлах определяется по формуле



$$t_{i\,\alpha}^{i} = \frac{1}{\mu_{ii}(n_{ii} - \rho_{ii})} = \frac{v_{ij}}{n_{ii} - x_{ii} \cdot v_{ii}}$$
(10)

где  $x_{ij}$  – суммарная интенсивность транзитных потоков в ij-м направлении связи.

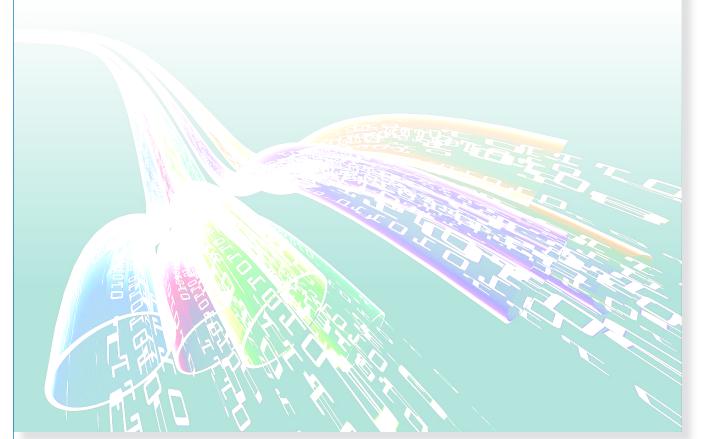
Решение подобной задачи осуществляется путем рационального ограничения числа переприемов и балансировкой информационных потоков по направлениям связи как приводится, например, в [3].

Таким образом, представленный методический аппарат оптимального управления топологией и трафиком в мультисервисной цифровой сети радиосвязи позволяет наиболее эффективно использовать предоставленный частотный диапазон для организации сети беспроводной связи на определенном участке местности.

Дальнейшее совершенствование методики управления коммутационными ресурсами заключается в уточнении статистических данных

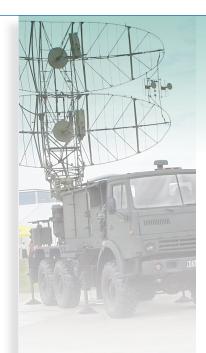
об активности абонентов и прогнозировании информационной нагрузки, например, с помощью модели, изложенной в [4].

- 1. Филлипс Д., Гарсиа-Диалс А. Методы анализа сетей: Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 496 с., ил.
- 2. Степанов С.Н. Теория телетрафика: концепции, модели, приложения. М.: Горячая линия–Телеком, 2015. 868 с: ил.
- 3. Будко П.А., Линец Г.И., Мухин А.В., Фомин Л.А. Эффективность, цена и качество информационно-телекоммуникационных систем. Методы оптимизации: СПб.: ВАС, 2011. 420 с.
- 4. Потапов С.Е. Математическая модель статистической обработки информации о состоянии сети // Сборник трудов XXII международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж: НПФ «САКВОЕЕ», 2016. С. 500-507.









УДК 621.396.96

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ МОЩНОСТИ ПОЛЕЗНОГО СИГНАЛА И ШУМА НА ВХОДЕ ПРИЕМНОЙ АНТЕННЫ РЛС В РАЗЛИЧНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ В ЛЕСИСТОЙ МЕСТНОСТИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ДЛИН ВОЛН

THE CALCULATION RESULTS OF POWER OF THE USEFUL SIGNAL AND NOISE AT THE INPUT OF THE RECEIVING ANTENNA OF THE RADAR UNDER VARIOUS CLIMATIC CONDITIONS IN A WOODED AREA AT DIFFERENT VALUES OF WAVELENGTHS

#### Антон Игоревич Бочаров

младший научный сотрудник филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов) Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17 Тел.+7(977)261-76-88

#### Константин Иванович Меша

кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов) Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17 Тел.+7(916)165-44-01

#### Аннотация

В статье рассмотрены расчетные значения определения мощности полезного сигнала и шума на входе приемной антенны радиолокационной станции в зависимости от расстояния обнаружения и коэффициента затухания сигнала для различных длин волн без учета накопления импульсов.

**Ключевые слова:** радиолокационная станция, сигнал, шум, импульс, вероятность обнаружения, частота зондирования, коэффициент затухания, ложная тревога, пропуск сигнала.

#### Summary

This article describes the calculated values of the determining power of the useful signal and noise at the input of the receiving antenna of the radar station, depending on the detection distance and the attenuation coefficient for different wavelengths without regard to the accumulation of pulses

**Keywords:** radar, signal, noise, pulse, the probability of detection, the frequency-sensing damping factor, a false alarm, missing alarm.

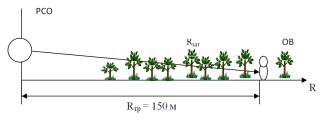
Методика обоснования требуемой частоты зондирования радиолокационной системой обнаружения объекта вторжения (ОВ) рассмотрена на примере использования РЛС в лесистой местности, состоящей преимущественно из дубовых пород деревьев.

Исследование проведено на примере импульсной радиолокационной системы обнаружения «Фара-ПВ», предназначенной для охраны объектов в лесистой местности. Радиолокационную систему можно настроить на четыре различных несущих частоты, литеры которых представлены ниже:

- 402,725 МГц;
- 411, 775 МГц;
- 420,825 МГц;
- 429,875 МГц;

Схема наблюдения ОВ в лесистой местности, состоящей преимущественно из дубовых пород деревьев, приведена на pисунке 1.

Тип местности влияет на различные показатели качества радиолокационной системы обнаружения, но существенным фактором для вероятности обнаружения ОВ наряду с типом мест-



**Рис. 1.** Схема наблюдения объекта вторжения в лесистой местности, состоящей преимущественно из дубовых пород деревьев



# (45)2017

# РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

ности является состояние атмосферы, которое может значительно снизить эффективность работы РАС как на открытой местности, так и в лесном массиве. Для определения эффективности работы РАС при различных климатических условиях был проведен анализ влияния различных типов осадков на распространение сигнала в атмосфере. За основу были взяты данные справочников и статистики в метеорологии и климотологии, а также данные из диссертационной работы Степаненко В.Д. «Радиолокация в метеорологии».

Определены основные типы осадков на территории Российской Федерации, их интенсивность и относительная диэлектрическая проницаемось атмосферы с различными типами осатков при нормальном атмосферном давлении [3], данные представлены в таблице 1.

Расчеты по определению вероятностей обнаружения проведены в несколько этапов. В исследовании были определены, какие наиболее неблагоприятные условия могут влиять на работу РАС в лесистой местности. Был определен тип лесного массива – это лес, состоящий преимущественно из дубовых пород деревьев. Расчеты проводились при различных несущих частотах РАС «Фара-ПВ» с накоплением и без накопления импульсов, а также при различных значениях порогового напряжения, Ре-

Таким образом, из данных расчетов можно сделать вывод, что для повышения вероятности обнаружения объекта вторжения при зондировании в лесистой местности без климатических осадков достаточно увеличить количество импульсов, а в условиях, когда присутствуют атмосферные осадки, необходимо также применение других способов, позволяющих повысить вероятность обнаружения объекта вторжения на требуемом расстоянии, а именно, увеличение высоты антенно-фидерного устройства и количества импульсов.

зультаты расчетов приведены в таблицах 2 и 3:

Таблица 1
Относительная диэлектрическая проницаемость атмосферы с различными типами осадков при нормальном атмосферном давлении

Вид атмосферных осадков	Интенсивность атмосферных осадков	Температура	Относительная диэлектрическая проницаемость (10-²)
Дождь	5-20 мм/ч (умеренная)	+20°C	2,03
Снег сухой	0.1-1 мм/ч (средняя)	-10°C	2,64
Снег мокрый	0.1-1 мм/ч (средняя)	-10°C	2,17
Туман	Водность ~ 0.5 г/м3	+5°C	2,33

# Таблица 2 Сводная таблица результатов расчета требуемой вероятности обнаружения объекта вторжения радиолокационной системой без учета накопления импульсов

Частота	Отношение сигнал шум на входе приемник а	Пороговое значение напряжени я на входе приемника	Вероятность ложной тревоги, Рлт	Вероятность пропуска сигнала, Рис	Вероятность обнаружения
402,725Мгц	4.66	1	0.3679	0.0055	0.9945
411,775Мгц	4.77	1	0.3679	0.0051	0.9949
420,825Мгц	5.01	1	0.3679	0.0042	0.9958
429,875Мгц	5.18	1	0.3679	0.0037	0.9963

# Таблица 3 Сводная таблица результатов расчета требуемой вероятности обнаружения объекта вторжения радиолокационной системой с учетом накопления импульсов

Частота	Отношение сигнал шум на входе приемника	Количество импульсов, п	Пороговое значение напряжения на входе приемника	Вероятность ложной тревоги, Рлт	Вероятность пропуска сигнала, Рпс	Вероятность обнаружения
402,725Мгц	4.66	2	1	0.1353	3.0288·10-5	0.9886
411,775Мгц	4.77	2	1	0.1353	1.8318·10-5	0.9887
420,825Мгц	5.01	2	1	0.1353	3.2268·10 <sup>-6</sup>	0.9888
429,875Мгц	5.18	2	1	0.1353	2.2805·10-7	0.9889

- 1. Отчет по НИР. Шифр «Левкой-2Т». Руководитель темы Преображенский Н.Н. Тула: ОАО НИИ «Стрела», 2006.
- 2. Степанов С.В. Уравнение дальности радиолокационного наблюдения с учетом затухания электромагнитных волн. // Сборник трудов XXIV Межведомственной НТК. Часть 3. Серпухов: СВИ РВ, 2005 С. 138-140.
- 3. Справочное руководство по метеорологии и климатологии // С.П. Хромов, М.А. Петросянц. М.: Наука, 2006.





УДК 621.37

# АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ **АСО ОБЪЕКТОВ РВСН**

**ANALYSIS OF WAYS TO IMPROVE THE EFFECTIVENESS** OF ASO OBJECTS OF THE STRATEGIC MISSILE FORCES

## Антон Игоревич Бочаров

младший научный сотрудник филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов) Адрес: 142210, Московская обл.,

г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17

Тел.+7(977)261-76-88

#### Константин Иванович Меша

кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов) Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17 Тел.+7(916)165-44-01

#### Аннотация

В статье рассмотрен анализ способов повышения эффективности автоматизированных систем охраны объектов Ракетных войск стратегического назначения, определены основные показатели эффективности и ее зависимости.

Ключевые слова: критерий, автоматизированная система охраны, вероятность обнаружения, объект вторжения, эффективность, автоматизированная система обнаружения.

In the article the analysis of methods for increasing the efficiency of the automated systems of protection of objects of the strategic missile forces, identified key performance indicators and its

Keywords: criteria, automated security system, probability of detection, the object of the invasion, the effectiveness of the automated detection system.

Наиболее полную оценку эффективности АСО ПГРК можно провести с помощью интегрального показателя эффективности, полученного в реальных оперативных условиях.

Этот показатель определяется следующим соотношением

$$\Phi_u = N_3 / N_d \tag{1}$$

где  $N_{_{3}}$  – число элементов РК, не получивших ущерб от совершения диверсии;

 $N_d$  – число элементов РК, подвергшихся воздействию противника.

Однако в моделируемых условиях невозможно оценить эффективность системы охраны интегральным показателем, следовательно, показатель эффективности будем принимать как вероятностную характеристику.

В качестве показателя эффективности системы Ф0 используется вероятность выполнения системой охраны своих функций по предотвращению скрытого проникновения нарушителей к охраняемому объекту в заданном интервале времени при определенных условиях

$$\Phi_0 = F_0(\mid h \mid ; E_{oi}; E_{bi}; R_{an}; H_{nc})$$
 (2)

где  $\Phi_0$  – показатель эффективности системы охраны; |h| – функциональное представление структуры системы охраны и взаимодействия ее эле-

 $E_{0i}$  – показатель эффективности і-го периметрового технического средства обнаружения;

 $E_{hi}$  – показатель эффективности і-го технического средства воздействия;

 $R_{am}$  – показатель надежности аппаратуры управления электропитанием;

 $H_{\pi c}$  – характеристики операторов TCO и личного состава ДСОО-К.

Наряду с общей характеристикой качестваэффективностью, которая оценивает систему охраны как единое целое, в отдельных случаях представляют интерес характеристики СО, определяющие частные показатели системы. Таким дополнительным частным показатели качества системы может служить эффективность обнаружения.



За показатель эффективности обнаружения  $(\Phi_m)$  принимается вероятность выполнения подсистемой обнаружения (ПО) функций фиксирования факта вторжения при попытке проникновения нарушителя на ПБСП в заданном интервале времени при определенных условиях.

Показатель эффективности обнаружения  $\Pi O$  i-го способа проникновения можно записать в следующем виде

$$\Phi_m = F(\mid h^T \mid ; E^j_{oi}; R_{ayi}; R_{ayn}; H^T_{nc}), \qquad (3)$$

где  $\mid h^T \mid$  – представление структуры системы охраны и взаимосвязи элементов при выполнении функций обнаружения;

 $E^{j}_{oi}$  – показатель эффективности i-го технического средства обнаружения для j-го способа проникновения;

 $R_{ayi}$  – показатель надежности элементов аппаратуры управления і-го канала;

 $H^{T}_{nc}$  – характеристики операторов ТСО и личного состава ДСОО-К.

Поскольку эффективность зависит от большого количества случайных факторов, показатели эффективности, как правило, являются усредненными характеристиками. Для оценки подсистемы обнаружения целесообразно иметь один показатель, усредненный по способам проникновения –  $\Phi_m$ .

На эффективность системы охраны влияет множество факторов. Полный учет всех факторов и характеристик невозможен и нецелесообразен, так как чрезмерная детализация процесса функционирования приводит лишь к усложнению вычислений, не давая при этом выигрыша точности определения показателя эффективности. Кроме того, задача исследования эффективности состоит в том, чтобы выявить зависимость эффективности от важнейших факторов и в дальнейшем, влияя на эти факторы, изыскать способы повышения эффективности и добиться ее максимального значения.

В качестве показателя эффективности подсистемы обнаружения  $\Phi_m$  принимается вероятность выполнения ТСО своих функций по предотвращению проникновения

$$\Phi_m = P_{coi} P_{moi} \cdot P_{oi} \cdot R_{oi}, \tag{4}$$

где  $P_{\emph{zoi}}$  – вероятность перехода ПО из исходного состояния в состояние готовности к применению по назначению в заданное время;

 $P_{\infty i}$  – вероятность неповреждения ПО при открытом воздействии нарушителя;

 $P_{oi}$  – вероятность обнаружения нарушителя ПО;  $R_{oi}$  – обобщенный показатель надежности ПО.

На практике при построении ПО выбирают алгоритм функционирования подсистемы и размещения ТСО, находящиеся в исходном состоянии в дежурном режиме, чтобы обеспечить значение  $P_{zoi} \approx 1$ .

Вероятность неповреждения тоже можно принять равной единице  $P_{\infty i}=1$ , т.к. при выходе из строя TCO автоматика формирует сигнал о срабатывании средства.

Показатель  $P_{oi}$  характеризует потенциальные возможности технического средства обнаружения выполнять функции по предназначению при заданной конструкции. Он зависит от большого числа внешних факторов, в том числе:

- климатических, метеорологических и географических условий применения;
- скорости и способов проникновения нарушителя на элементы БРК;
- знание нарушителем принципов действия технических средств обнаружения;
- степени маскировки отдельных средств и т.д. Таким образом, исходя из вышеизложенного, эффективность напрямую зависит от вероятности обнаружения, т.е.

$$\Phi_m \approx P_{oi}$$
(5)

Для определения вероятности обнаружения необходимо ввести следующие допущения:

- до начала и в ходе выполнения задач по предназначению ТСО не подвергались активному воздействию нарушителя по выведению их из строя  $P_{\infty i}=1$ ;
- в заданный момент времени TCO готово к применению по предназначению  $P_{20i} \approx 1;$
- TCO обладают абсолютной надежностью  $R_{oi} = 1$ .

Географические условия расположения БРК таковы, что в основном вероятность обнаружения нарушителей на подступах к агрегатам ограничивается характеристиками прилегающей местности, климатическими условиями и ТТХ самих технических средств обнаружения.

- 1. Надежность и эффективность в технике. Справочник. Т.9. Техническая диагностика / Под. общ. ред. В.В. Клюева, П.П. Пархоменко. М.: Машиностроение, 1987. 352 с.
- 2. Научно-методические материалы. Методы и средства повышения эффективности системы охраны объектов РВСН. МО СССР, 1985. 101 с.
- 3. Петухов Г.Б. Основы теории эффективности целенаправленных процессов. Ч. 1. Методология, методы, модели. МО СССР, 1989. 660 с.





УДК 621.391

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕДУРЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОРГАНИЗАЦИИ СОЕДИНЕНИЯ (ALE) «ТОЧКА-ТОЧКА» В СИСТЕМЕ ДЕКАМЕТРОВОЙ РАДИОСВЯЗИ НА БАЗЕ ПРОТОКОЛА MIL-STD-188-141В

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCEDURE OF AUTOMATIC CONNECTION (ALE) «POINT-TO-POINT» IN THE SYSTEM OF DECAMETRIC RADIO COMMUNICATION ON THE BASIS OF THE PROTOCOL MIL-STD-188-141B

#### Ильяс Вепаевич Реджепов

адъюнкт

филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов) Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17 Тел.: 8(905)095-06-66

## Дмитрий Александрович Токарев

начальник отдела УПМИ и СП

Министерство обороны России Адрес: 119160, Москва, Москворецкая набережная, д.9а

### Александр Михайлович Вальваков

почётный работник науки и техники РФ доктор технических наук, профессор

Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Б. Ударный пер., д. 1а

Тел.: +7 (4967) 35-31-93

#### Аннотация

Одной из составляющих протокола MIL-STD-188-141В является протокол менеджера связи. В статье представлена математическая модель нахождения вероятностно-временных и временных характеристик процедуры организации соединения (ALE) «точкаточка» в указанном протоколе на основе теории конечных марковских цепей.

**Ключевые слова:** автоматическая организация соединения (ALE), протокол MIL-STD-188-141B, вероятностно-временные характеристики, интервал вызова.

#### Summary

One of the components of the protocol MIL-STD-188 -141B is the communication manager's protocol. The article presents a mathematical model of finding the probability-time and time characteristics of the procedure for organizing the connection (ALE) "point-to-point" in the specified protocol on the basis of the theory of finite Markov chains.

**Keywords:** automatic connection organization (ALE), protocol MIL-STD-188-141B, probability-time characteristics, call interval.

В настоящее время декаметровая (ДКМ) радиосвязь является одним из самых дешевых способов передачи информации на большие расстояния по критерию «эффективность-стоимость». Наиболее полно проработанным является совокупность подходов к построению ДКМ радиосвязи, зафиксированная в стандарте MIL-STD-188-141В [6]. Однако, применение тех или иных технических решений, заложенных в этом стандарте для конкретных целей и условий, требует оценки их применения.

Последнее требует построения соответствующих моделей.

Одним из важных этапов применения радиосистемы ДКМ радиосвязи является этап установления соединения различной конфигурации, наиболее простым из которых является соединение «точка-точка». Указанная система может работать как в синхронном, так и в асинхронном режимах. В данной работе приведена математическая модель данного процесса, использующего протокол синхронного вызова, по-



тому что этот метод является более предпочтительным для обеспечения высокой производительности при умеренной загрузке сети [6].

Рассматривается радиосистема, построенная по принципам, описанным в стандарте MIL-STD-188-141В, который предусматривает автоматическое установление соединения (ALE). В данной сети все сканирующие приемники меняют частоту приема приблизительно в одно и то же время (т.е. с относительно небольшой разностью во времени) в соответствии с определенным списком частот. Структурная схема такой системы представлена на рисунке 1. Она включает в себя определенное количество К приемопередающих станций АС, разделенных в так называемые группы вызова.

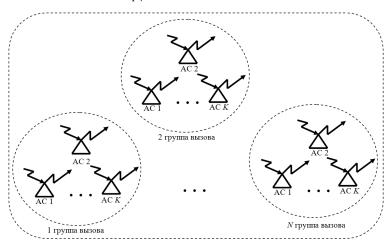


Рис. 1. Структурная схема ДКМ радиосети

В общем случае предполагается разделение сети на 32 группы вызова по 60 станций в каждой группе. Станции-члены одной группы в определенный промежуток времени, называемый периодом, следят за одним и тем же каналом, отличным от того, за которым следят станции-члены другой группы в течение этого же периода. Таким образом, достигается распределение поступающих станциям-абонентам сети вызовов по времени и/или частоте, что значительно снижает вероятность их конфликтов.

Для организации соединения «точка-точка» вызывающая АС вычисляет частоту, которая должна прослушиваться необходимой АС в момент вызова и произвольно выбирает один из интервалов вызова *n*, соответствующего этому моменту. В течение интервала прослушивания данного периода вызывающая АС прослушивает соответствующий канал передачи данных с целью выяснения, завершена ли по нему предыдущая передача. Затем последовательно прослушиваются интервалы вызова данного периода. Если в интервалах, предшествующих выбранному ин-

тервалу вызова, производился обмен блоками процедуры вхождения в связь другими станциями, то данная станция откладывает свой вызов до завершения этой процедуры. В противном случае вызывающая АС посылает в течение интервала n свой запрос и в интервале (n+1) ожидает ответ на него от вызываемой АС. Если для вызова был выбран интервал n=1, вызывающая станция отправляет свой запрос, как наиболее приоритетный, в течение этого интервала.

При получении в течение одного из интервалов адресованного ей запроса вызываемая АС в следующем интервале посылает подтверждение, в котором может содержаться информация о подходящем для обмена данными канале. При наличии такой информации станции завершают процеду-

ру вхождения в связь, иначе процедура вхождения в связь продолжается в следующем периоде на частоте следующего канала вызова из списка вызываемой АС выбором вызывающей АС одного из интервалов этого периода и посылкой запроса [6].

Процесс доведения сообщений происходит в дискретные моменты времени, вызванные передачей блоков запроса связи и блоков подтверждения, и имеет конечное число состояний, при этом имеются состояния, выход из которых невозможен. Также необходимо отметить, что вероятностные характеристики процесса в любой момент времени зависят только от состояния, в ко-

тором процесс находится и не зависит от того, каким образом он в это состояние пришел. Именно поэтому его удобно представлять в виде поглощающей конечной марковской цепи (ПКМЦ) [3,4,5]. Граф переходов ПКМЦ для процесса автоматического установления соединения (ALE) «точка-точка» представлен на рисунке 2.

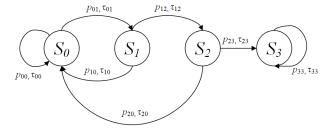


Рис. 2. Граф переходов ПКМЦ для процесса автоматической организации соединения (ALE) «точка-точка»

Формализуем состояния указанной ПКМЦ, при этом нумерацию состояний будем осуществлять по следующему правилу: «состояния процесса нумеруются слева-направо и сверху-вниз». Тогда имеем следующие состояния:

 $S_{\theta}$  – вызывающая АС настроилась на частоту вызываемой АС, слушает канал передачи данных на интервале прослушивания (настройки);

 ${
m S}_I$  – канал передачи данных свободен, вызывающая AC отправила блок запроса связи (БЗС);

 $S_2$  – вызываемая АС приняла БЗС, отправила блок подтверждения (БП);

 $S_3$  – вызывающая АС приняла БП, процедура вхождения в связь завершена.

Здесь необходимо отметить, что в рассматриваемой процедуре организации соединения имеется несколько интервалов вызова, в течение которых вызывающая АС может инициировать процедуру вхождения в связь. Выбор того или иного интервала вызова зависит от приоритетности данных, которые необходимо передать на вызываемую АС. Также имеет значение процесс анализа информации, передаваемой в БП, однако в приведенной модели данные особенности учитываться не будут. Для чего введем ряд допущений.

**Допущение 1.** Для вызова выбирается первый интервал вызова (n=I), в течение которого вызывающая АС просто отправляет БЗС (как наиболее приоритетный).

**Допущение 2.** Блок подтверждения, полученный вызывающей АС, содержит информацию о номере канала, на котором вызываемая АС будет ожидать передаваемые данные.

Матрица переходных вероятностей (МПВ)  $P_{[4,4]}$  для данной ПКМЦ имеет вид:

$$P_{[4,4]} = \begin{bmatrix} p_{00} & p_{01} & 0 & 0 \\ \hline p_{10} & 0 & p_{12} & 0 \\ \hline p_{20} & 0 & 0 & p_{23} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(1)

Для нахождения компонентов МПВ (1) введем обозначения:

 $p_{cs}$  – вероятность свободы КПД, которая определяется по формуле

$$p_{\rm cb} = \frac{(\lambda \tau)^k}{k!} e^{-\lambda \tau},$$

где k – номер выбранного интервала;

 $\lambda$  – интенсивность потоков вызова;

 $\tau$  – длительность интервала вызова, равная 800 мс;  $p_{E3C}$  – вероятность доведения БЗС, которая определяется по формуле

$$p_{\rm B3C} = (1 - p_0)^{L_{\rm B3C}}$$

где  $L_{B3C}$  – длина БЗС в битах;

 $p_{B\Pi}$  – вероятность доведения БП, которая определяется по формуле

$$p_{\mathsf{B}\mathsf{\Pi}} = (1 - p_{\mathsf{0}})^{L_{\mathsf{B}\mathsf{\Pi}}}$$

где  $L_{B\Pi}$  – д<br/>лина БП в битах;

 $q_{cs}$  – вероятность занятости КПД;

 $q_{E3C}$  – вероятность недоведения БЗС;  $q_{E\Pi}$  – вероятность недоведения БП.

При этом [1]:

$$q_{ce} = 1 - p_{ce}, \tag{2}$$

$$q_{B3C} = 1 - p_{B3C}, \tag{3}$$

$$q_{B\Pi} = 1 - p_{B\Pi},\tag{4}$$

Рассмотрим первую строку матрицы (1). Переход из S0 в S1 возможен при завершении предыдущей передачи, т.е. при свободном канале передачи данных. Вероятность такого события равна

$$p_{01} = p_{cs}. (5)$$

Тогда

$$p_{00} = 1 - p_{01} = 1 - p_{ce}. (6)$$

Рассмотрим вторую строку матрицы (1). Переход из  $S_I$  в  $S_2$  возможен, если вызываемая АС примет БЗС от вызывающей АС. Вероятность такого события равна

$$p_{12} = p_{B3C}. (7)$$

Тогда

$$p_{10} = 1 - p_{12} = 1 - p_{B3C}. (8)$$

Рассмотрим третью строку матрицы (1). Переход из  $S_2$  в  $S_3$  возможен, если вызывающая АС примет БП от вызываемой АС. Вероятность такого события равна

$$p_{23} = p_{B\Pi}. (9)$$

Тогда

$$p_{20} = 1 - p_{23} = 1 - p_{B\Pi}. \tag{10}$$

Подставив соответствующие значения рсв,  $p_{B3C}, p_{B\Pi}, q_{ce}, q_{B3C}, q_{B\Pi}$ , можно получить все компоненты искомой МПВ [3,4].

Вероятность вхождения в связь в соединении «точка-точка» после каждого шага процедуры определяется с помощью уравнения Колмогорова-Чепмена (УКЧ), которое имеет следующий вид [2,4]:

$$P_{s(n)}^{(k)} = P_{s(n)}^{(0)} P_{[n,n]}^{k} = P_{s(n)}^{(k-1)} P_{[n,n]}, (10)$$

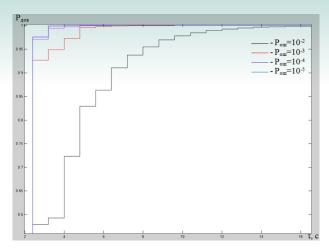
где  $P_{s(n)}^{(0)} = \langle P_{s_1}^{(0)}, P_{s_2}^{(0)}, ..., P_{s_i}^{(0)}, ..., P_{s_n}^{(0)} \rangle$ -вектор вероятностей состояний цепи на нулевом шаге;

$$P_{s(n)}^{(k-1)}, P_{s(n)}^{(k)}$$
 – вектор вероятностей состо-

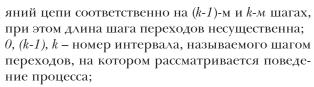


# Je3(45)2017

# РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ



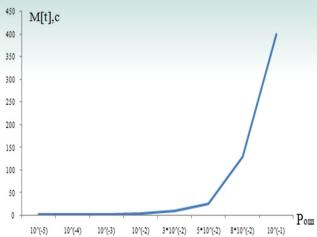
**Рис. 3.** ВВХ процедуры автоматической организации соединения (ALE) «точка-точка» системы ДКМ радиосвязи



 $P_{[n,n]}$  – матрица переходных вероятностей (МПВ). Результаты расчета ВВХ процедуры автоматической организации соединения «точка-точка» с учетом МПВ (1), представленные на рисунке 3, показывают, что, во-первых, ненулевое значение вероятности автоматической организации соединения появляется на четвертом шаге процесса, что согласуется с графом на рисунке 2, и, во-вторых, указанный интервал составляет 2,4с, что соответствует физике рассматриваемого процесса.

Кроме того, из МПВ формируются фундаментальная матрица, по которой находится значение среднего времени процедуры автоматической организации соединения «точка-точка» [3, 4]. Результаты расчета среднего времени процедуры автоматической организации соединения (ALE) с учетом МПВ, представлены на рисунке 4 и соответствуют физике процесса.

Дальнейшие исследования целесообразно продолжить в направлении математического моделирования процедуры автоматической организации соединения (ALE) «точка-точка» системы ДКМ радиосвязи с учетом вариации выбора одного из интервалов вызова, а также анализа информации, содержащейся в БП, который вызываемая АС посылает вызывающей АС в ответ на поступивший от нее запрос на вхождение в связь.



**Рис. 4.** График среднего времени процедуры автоматической организации соединения (ALE) «точкаточка» системы ДКМ радиосвязи

- 1. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: Учебник для студ. вузов. 10-е изд., стер. М.: Академия, 2005. 576 с.
- 2. Реджепов И.В., Цимбал В.А., Девятияров В.Б. Нахождение характеристик доведения сообщений в соединении «точка-точка» в командной радиосети // Сборник научных трудов ОАО «Корпорация «МИТ». М., 2014. С. 35-41.
- 3. Цимбал В.А., Вальваков А.М., Попов М.Ю. Анализ характеристик конечных марковских цепей при разных шагах переходов // Известия Института инженерной физики, 2014. № 1(31). С. 53-56.
- 4. Цимбал В.А., Косарева Л.Н., Исаева Т.А., Потапов С.Е., Ваганов И.Н. Математическая модель доставки многопакетных сообщений в соединении «точка-точка» на сети передачи данных с процедурой «скользящее окно» // Известия Института инженерной физики, 2009. № 3(13). С. 13-19.
- 5. Цимбал В.А. Информационный обмен в сетях передачи данных. Марковский подход: монография. М.: Вузовская книга, 2014. 144 с.: ил.
- 6. MIL-STD-188-141B, "Interoperability and Performance Standards for Medium and High Frequency Radio Systems, Notice 1, 31.08.2001; Appendix C "Third-Generation HF Link Automation".



УДК 654.16, 623.618

НАХОЖДЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДОСТАВКИ СООБЩЕНИЙ В СЕТЯХ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С СОЕДИНЕНИЯМИ «ТОЧКА-МНОГОТОЧКА» ПРИ РАЗЛИЧНОМ КАЧЕСТВЕ КАНАЛОВ СВЯЗИ

FINDING THE PROBABILISTIC-TEMPORAL CHARACTERISTICS OF MESSAGE DELIVERY IN **DATA NETWORKS WITH «POINT-TO-MULTIPOINT» CONNECTIONS WITH DIFFERENT QUALITY OF COMMUNICATION CHANNELS** 

#### Владимир Анатольевич Цимбал

заслуженный деятель науки РФ доктор технических наук, профессор профессор кафедры «АСУ»

филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)

Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17

ведущий научный сотрудник

управление АСУ и связи МОУ «ИИФ» Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,

Большой Ударный пер., д. 1а Тел.: +7 (4967) 35-31-93 E-mail: tsimbalva@mail.ru

## Александр Анатольевич Москвин

начальник отдела ОАО «Корпорация «Комета»

Адрес: 115280, Москва, ул. Велозаводская, д. 5

Тел.: 8(905)722 92 23

E-mail: moskvin375@rambler.ru

#### Елена Алексеевна Довгополая

инженер 2 категории ОАО «Корпорация «Комета»

Адрес: 115280, Москва, ул. Велозаводская, д. 5

Тел.: 8(916)115 87 67 E-mail: e.a.dovg@yandex.ru

#### Аннотация

В рамках данной работы проводился анализ упрощенного подхода к синтезу матриц переходных вероятностей и матриц шагов перехода при оценке вероятностно-временных характеристик (ВВХ) информационного обмена в иерархических сетях передачи данных (СПД) при различном качестве каналов связи с помощью аппарата конечных марковских цепей (КМЦ). Закономерности синтеза указанных матриц разобраны на примере СПД с соединением типа «точка-многоточка» варианта «1-3». Предложенный подход позволяет упростить оценку ВВХ доведения сообщений до нижних звеньев управления (НЗУ) в иерархических СПД. Сделан вывод о необходимости продолжения исследований в данном направлении для совершенствования метода расчета ВВХ информационного обмена в СПД с различным количеством НЗУ.

Ключевые слова: сети передачи данных, звенья управления, вероятностно-временные характеристики информационного обмена, конечные марковские цепи, синтез матриц переходных вероятностей.

There is the analysis of the transition probability matrix and step transition matrix synthesis in estimating of information exchange probability-time characteristics (PTC) in the hierarchical data transmission networks (DTN) due to the different quality of communication channels using the finite Markov chains inside of this project. Principles of this matrix synthesis were investigated in case of «1–3» DTN «point – to – multipoint». The suggested approach allows simplifying of the message delivering to the lower command levels (LCL) PTC discovering in the hierarchical DTN. There is the conclusion of the necessity of further these field researches for the PTC calculation method improvement in case of information exchange in the DTN with the different number of LCL.

Keywords: data transmission networks, control links, probabilistic and temporal characteristics of information exchange, finite Markov chains, synthesis of transition probability matrices.

### Процесс доведения сообщений в сетях передачи данных при различном качестве каналов связи

В общем виде любая автоматизированная система управления представляет собой совокупность иерархических звеньев управления (ЗУ),

взаимодействующих между собой посредством информационной сети (ИС). Надежность информационного обмена (ИО) оценивается вероятностью гарантированного доведения сообщения за фиксированное время (вероятностно-временными характеристиками (ВВХ)) в конкретных ус-



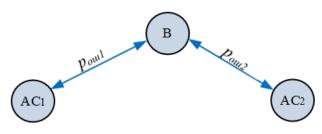
ловиях функционирования. Наиболее востребован для ИС с каналами связи (КС) невысокого качества по вероятности битовой ошибки протокол OSI канального уровня X.25 [1]. Поэтому методический аппарат анализа его характеристик обладает большой степенью общности и был использован в проведенном исследовании. Поскольку процесс доведения сообщений в сетях передачи данных (СПД) имеет конечное число состояний, происходит в дискретные моменты времени, связанные с передачей сообщения и квитанции, и в нём соблюдается марковское свойство (отсутствие последействия), то его удобно представлять в виде конечной марковской цепи (КМЦ) [2].

Вопрос оценки ВВХ доведения сообщений с помощью КМЦ в СПД, использующих КС одинакового качества по вероятности битовой ошибки, хорошо исследован [1]. Однако, в СПД между ЗУ различной иерархии, расположенными на больших расстояниях друг от друга в различных условиях помеховой обстановки и использующих КС различной физической природы (радио, спут-

никовые, проводные и пр.) не всегда возможно добиться однородности характеристик каналов. Поэтому целесообразно рассмотреть процесс доведения сообщений в СПД с различным качеством КС по вероятности битовой ошибки, представив его в виде КМЦ. Отметим, что под сообщением понимается один доставляемый кадр произвольной длины формата протокола X.25.

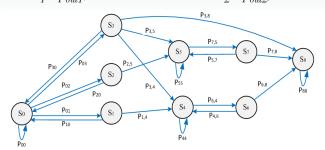
# СПД варианта «1-2»

Анализ иерархических СП $\mathcal{I}$  показывает, что они представляют собой совокупность базовых подсетей (сегментов), каждая из которых является информационной сетью ЗУ смежных уровней иерархии [3, 4]. Структурная схема СП $\mathcal{I}$  варианта «1-2» представлена на рисунке 1. Она включает две абонентские станции (АС $_{1}$  и АС $_{2}$ ) нижних звеньев управления (НЗУ) и одну станцию (В) верхнего звена управления (ВЗУ), соединенные радиально дуплексными каналами связи, неоднород-



**Рис. 1.** Структурная схема СПД типа «точка-многоточка» для варианта «1-2»

ными по вероятности битовой ошибки (при передаче одного бита информации в канале связи  $B\text{-}AC_1-p_{out}$ ), а в канале связи  $B\text{-}AC_2-p_{out}$ ).



**Рис. 2.** Граф переходов КМЦ СПД типа «точка-многоточка» с неоднородными по вероятности битовой ошибки каналами связи для варианта «1-2»

Направленный граф переходов КМЦ для указанного варианта СПД представлен на рисунке 2. Номера состояний графа и их взаимосвязи отображаются переходными вероятностями, а последние, в свою очередь, определяются своими индексами. Перечень состояний графа приведен в magnuelember 1.

Таблица 1
Состояния графа СПД типа «точка-многоточка» для варианта «1-2»

	$S_0$	станция В выдала повтор сообщения и ни один из получателей (АС1, АС2) его не
		получил
1	$S_1$	станция АС1 получила повтор сообщения и выдала квитанцию
-	$S_2$	станция АС2 получила повтор сообщения и выдала квитанцию
.	$S_3$	станции AC <sub>1</sub> и AC <sub>2</sub> получили сообщения и отправили квитанции
	$S_4$	станция В получила квитанцию от станции АС1
,	$S_5$	станция В получила квитанцию от станции АС2
-	$S_6$	станция АС2 получила сообщение и отправила квитанцию (квитанция от АС1 получена
		ранее)
	S <sub>7</sub>	станция АС1 получила сообщение и отправила квитанцию (квитанция от АС2 получена
		ранее)
	$S_8$	станция В получила квитанции от АС1 и АС2

Доведение сообщения (повтора сообщения) до некоторого числа абонентов может осуществляться с шагом длительностью tc. Коме того, существуют время шага доведения квитанции tкв и ненулевые шаги переходов, равные  $(t_c + t_{\it kg})$ . При этом

$$t_c = L_n/V_{nw}, t_{\kappa e} = L_{\kappa e}/V_{nu},$$

где  $L_n$  – длина сообщения (повтора сообщения);  $L_{\kappa \theta}$  – длина квитанции;  $V_{mu}$  – скорость передачи информации в канале связи.

Неоднородность по длительности шага перехода вынуждает к использованию в оценках ВВХ понятия среднего шага перехода в КМЦ [1], из-за чего возникает погрешность в расчетах времени доведения за фиксированное число шагов. В связи с этим целесообразно исследовать динамику математического ожидания и среднего квадратического отклонения (СКО) среднего шага перехода за фиксированное число шагов

процесса. Это можно сделать с учетом методов

расчета, представленных в [2], например, следу-

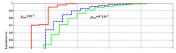
Известия института инженерной физики

ющим образом. Проводя пошаговое усреднение длительностей среднего шага перехода, получим последовательность значений оценок соответствующих его математических ожи-

даний (MO)  $\overline{M}_k$  , т.е.

где - длительность i-го среднего шага перехода;

k — максимальный текущий номер шага перехода, по совокупности которых проводится расчет. Тогда СКО по совокупности k средних шагов перехода будет оцениваться по формуле



Исходя из этого и применяя метод среднего шага перехода, получим, что время доведения за m шагов перехода будет равно

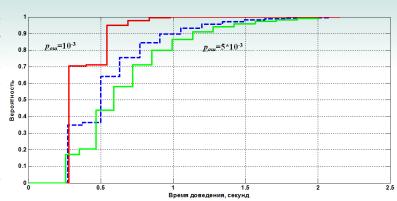
а его СКО равно

$$\overline{\sigma_n} = \sum_{k=1}^m \overline{\sigma_k}$$
.

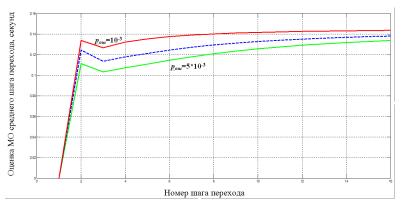
Таким образом, возможно отследить динамику математического ожидания и СКО длительности среднего шага перехода по шагам перехода и получить оценку точности времени информационного обмена при анализе ВВХ процесса доведения сообщений.

Проиллюстрируем расчет BBX информационного обмена в соединениях «точка-многоточка» при разном качестве каналов связи по вероятности битовой ошибки с использованием предлагаемого подхода на конкретном примере. Пусть для СПД «точка-многоточка» (рисунок 1) качество каналов связи различно и вероятность битовой ошибки составляет для направления  $B-AC_1 p_{out} = 10^{-3}$ , а для направления  $B-AC_2 p_{out} = 5*10^{-3}$ . Длина сообщения (по

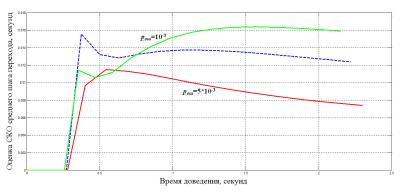
 $AC_2\,p_{ou2}=5*10^{-3}$ . Длина сообщения (повтора сообщения), передаваемого звеном В  $L_n$ =120 бит, длина квитанции  $L_{\kappa e}=56$  бит, скорость передачи информации во всех каналах связи  $V_{nu}$ =1200



**Рис. 3.** Зависимость вероятности доведения сообщения от времени при  $p_{out1}$ =10<sup>-3</sup> и  $p_{out2}$ =5\*10<sup>-3</sup> (пунктирная линия), при  $p_{out1}$ = $p_{out2}$ =10<sup>-3</sup> и при  $p_{out1}$ = $p_{out1}$ =5\*10<sup>-3</sup> (сплошные линии)



**Рис. 4.** Зависимость оценки МО среднего шага перехода по шагам процесса при  $p_{out1}$ =10<sup>-3</sup> и  $p_{out2}$ =5\*10<sup>-3</sup> (пунктирная линия), при  $p_{out1}$ =  $p_{out2}$ =10<sup>-3</sup> и при  $p_{out1}$ =  $p_{out2}$ =5\*10<sup>-3</sup> (сплошные линии)



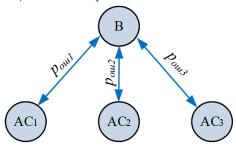
**Рис. 5.** Зависимость оценки СКО среднего шага перехода по шагам процесса при  $p_{out1}$ =10<sup>-3</sup> и  $p_{out2}$ =5\*10<sup>-3</sup> (пунктирная линия), при  $p_{out1}$ = $p_{out2}$ =10<sup>-3</sup> и при  $p_{out1}$ = $p_{out2}$ =5\*10<sup>-3</sup> (сплошные линии)

бит/с. Тогда оценка ВВХ и точности временных параметров при количестве шагов, равном 16, дает результаты, представленные на рисунках 3, 4 и 5 [6].



# СПД «точка-многоточка» варианта «1-3»

Структурная схема такой СПД представлена на pucynke 6. Она включает в себя три абонентские станции ( $AC_1$ ,  $AC_2$  и  $AC_3$ ) НЗУ и одну станцию (В) ВЗУ, соединенные радиально дуплексными каналами связи, неоднородными по вероятности битовой ошибки ( $p_{out1}$ ,  $p_{out2}$  и  $p_{out3}$ ). Процесс доведения сообщений происходит аналогично описанному выше случаю для варианта «1-2».



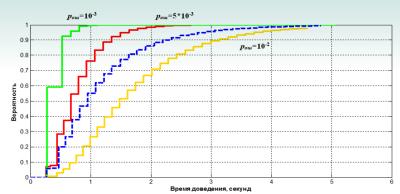
**Рис. 6.** Структурная схема СПД типа «точкамноготочка» для варианта «1-3»

Пусть для СПД «точка-многоточка» (рисунок 6) качество каналов связи различно и вероятность битовой ошибки составляет для направлений:  $B-AC_1$   $p_{out}=10^{-2}$ , для  $B-AC_2$   $p_{out}=5*10^{-2}$ 

 $^3$  и для B– $AC_3$   $p_{ous}$ = $10^{-3}$ . Длина повтора сообщения, передаваемого звеном В, длина квитанции и скорость передачи информации во всех каналах связи имеют те же значения, что и в варианте «1-2».

На рисунках 7, 8 и 9 показаны зависимости вероятности доведения сообщения от времени в СПД с неоднородными по вероятности ошибки каналами связи для варианта «1-3» и оценка точности временных параметров доведения сообщения при  $p_{out}=10^{-2}$ ,  $p_{out}=5*10^{-3}$  и  $p_{out}=10^{-3}$  (пунктирная линия).

Для сравнения на рисунках 7, 8, 9 построены графики результатов оценки ВВХ и точности временных параметров для СПД варианта «1-3» с одинаковым качеством каналов связи при  $p_{out1} = p_{out2} = p_{out3} = 10^{-3}$ ,  $p_{out1} = p_{out2} = p_{out3} = 10^{-2}$  (сплошные линии) для 36 шагов.



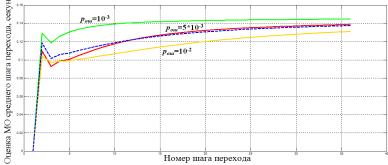
**Рис. 7.** Зависимость вероятности доведения сообщения от времени в СПД варианта «1-3»

# СПД «точка-многоточка» варианта «1-4»

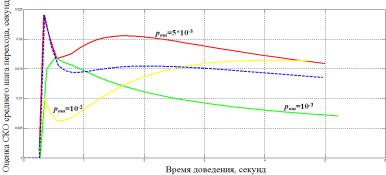
Структурная схема СПД варианта «1-4» представлена на pисунке 10.

Граф для СПД варианта «1-4», МПВ  $P_{[81,81]}$  и МШП  $T_{[81,81]}$  для СПД типа «точка-многоточка» для варианта «1-4» получаем подобно вариантам «1-2» и «1-3» [6].

Полученные результаты применим для расчета СПД варианта «1-4» при вероятности битовой ошибки для направлений:  $B-AC^1$   $p_{out}=10^{-2}$ , для  $B-AC^2$   $p_{out}=5*10^{-3}$ , для  $B-AC^3-p_{out}=10^{-3}$  и для  $B-AC_4-p_{out}=10^{-4}$ . Длина повтора сообщения, квитанции и скорость передачи информации такие же, как и в вариантах «1-2» и «1-3».

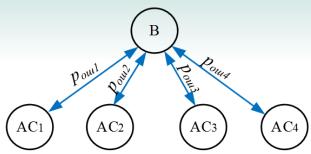


**Рис. 8.** Зависимость оценки МО среднего шага перехода по шагам процесса

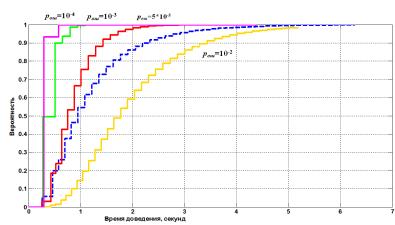


**Рис. 9.** Зависимость оценки СКО среднего шага перехода по шагам процесса

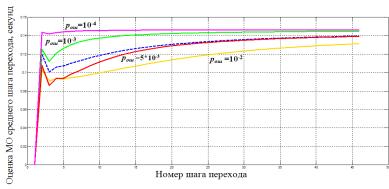




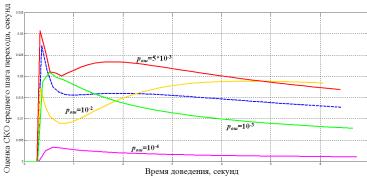
**Рис. 10.** Структурная схема СПД типа «точка-многоточка» для варианта «1-4»



**Рис. 11.** Зависимости вероятности доведения сообщения от времени в СПД для варианта «1-4»



**Рис. 12.** Зависимость оценки МО среднего шага перехода по шагам процесса



**Рис. 13.** Зависимость оценки СКО среднего шага перехода по шагам процесса

Зависимость вероятности доведения сообщения от времени в СПД рассматриваемого варианта показана на рисунке 11 пунктирной линией. На рисунках 12 и 13 представлены графики по динамике среднего шага перехода с оценкой СКО как параметра, характеризующего точность временной оценки, для количества шагов, равного 46. Для сравнения сплошной линией построены графики для СПД варианта «1-4» с одинаковым качеством каналов связи при

$$\begin{aligned} p_{ou1} &= p_{ou2} = p_{ou3} = p_{ou4} = 10^{-4}, \\ p_{ou1} &= p_{ou2} = p_{ou3} = p_{ou4} = 10^{-3}, \\ p_{ou1} &= p_{ou2} = p_{ou3} = p_{ou4} = 5*10^{-3}, \\ p_{ou1} &= p_{ou2} = p_{ou3} = p_{ou4} = 10^{-2}. \end{aligned}$$

Из анализа зависимостей доведения сообщения от времени, приведенных на рисунках 3, 7 и 11 следует, что полученные значения вероятности доведения сообщений для СПД вариантов «1-2», «1-3» и «1-4» с различным качеством КС (пунктирная линия) располагаются между графиков для СПД вариантов «1-2», «1-3» и «1-4» с одинаковым качеством КС (сплошная линия), соответствующим предельным значениям битовой ошибки в КС разного качества. В части оценки точности временных параметров, из рисунков 5, 9 и 13 следует, что вносимая наличием различных по длительности шагов перехода погрешность может быть признана удовлетворительной, однако актуальной является разработка методов, позволяющих ее нивелировать.

# Особенности моделирования процесса информационного обмена в сетях передачи данных с соединениями «точкамноготочка» при различном качестве каналов связи

Согласно изложенному выше отмечается прямая взаимосвязь размера матриц переходных вероятностей (МПВ) и шагов перехода (МШП) от количества нижних звеньев управления (НЗУ) рассматриваемых сегментов СПД. Число столбцов (строк) в таких матрицах рассчитывается по формуле:

$$I=3^N, (1)$$

где I – количество строк и столбцов МПВ и МШП;

N – количество НЗУ в сегменте СПД.



Из приведенного выражения (1) следует, что с ростом количества НЗУ в сегменте СПД количество строк и столбцов МПВ и МШП будет значительно увеличиваться. Так, для СПД типа «точка-многоточка» варианта «1-3» N=27, варианта «1-4» N=81, варианта «1-5» N=243 и так далее. Это существенно затрудняет расчеты ВВХ таких СПД. В связи с этим актуальна задача поиска подходов к сокращению размеров МПВ и МШП для оценки ВВХ доставки сообщений с использованием аппарата КМЦ.

# Закономерности построения матриц переходных вероятностей в СПД с соединениями «точка-многоточка» при различном качестве каналов связи

С целью поиска универсального метода синтеза МПВ для нахождения ВВХ с помощью КМЦ для СП $\mathcal{A}$  с большой нормой управляемости проанализируем МПВ СП $\mathcal{A}$  типа «точка-многоточка» варианта «1-3», приведенную на рисунке 14.

Вероятность доведения сообщения  $\mathbf{p}_c$  длиной  $L_c$  от B до одной AC за один повтор по каналу связи с вероятностью ошибки  $p_0$  находится по формуле

$$p_c = (1 - p_0)^{L_c}$$

а вероятность недоведения (искажения) равна

$$q_c = 1 - p_c$$

Вероятность доведения квитанции длиной  $L_{\kappa g}$  за один повтор от любой АС до В равна

$$p_{KB} = (1 - p_0)^{L_{KB}},$$

а, соответственно, вероятность искажения (недоведения) равна

$$q_{KB} = 1 - p_{KB}$$

Отметим, что помехоустойчивое кодирование доводимых сообщения и квитанции здесь не учитывается, что не снижает общности подхода.

Из анализа рисунка 14 видно, что около 70% элементов МПВ обозначают вероятности перехода в несуществующие состояния КМЦ и равны 0. Столь серьезная разреженность МПВ затрудняет нахождение вероятности доведения сообщений с применением методов, изложенных в [1] и пошаговом решении уравнения Колмогорова-Чепмена (УКЧ)

$$P^{(i)}_{< n>} = P^{(0)}_{< n>} \times P^{i}_{[n,n]} = P^{(i-1)}_{< n>} \times P_{[n,n]}, \quad (2)$$

где  $P^{(\theta)}_{< n>}, P^{(i)}_{< n>}, P^{(i-1)}_{< n>}$  – векторы вероятностей состояния процесса на  $\theta$ -м, i-м и i-I-м шагах,  $P_{[n,n]}$  – МПВ.

Поскольку при исследовании ИО в СПД решается задача нахождения ВВХ доведения сообщений до всех звеньев управления, преобразуем МПВ СПД варианта «1-3» (рисунок 11) размерностью 27х27 к виду, представленному на рисунке 15.

В процессе преобразования элементы МПВ на рисунке 14, расположенные в столбцах 1, 2 и 3, размещаются в столбце 1 полученной МПВ на рисунке 3 размерностью 11х11. Элементы столбцов 4, 5 и 6 размещены в столбце 2 новой МПВ и так далее. Аналогичные преобразования проведены со строками. На схеме МПВ 11х11 на рисунке 12 в скобках приведены номера столбцов и строк МПВ 27х27, элементы которых объединены в новом столбце (строке). Из анализа рисунка 12 следует, что количество столбцов матрицы, в которых размещаются вероятности перехода СПД в состояние, связанное с доведением сообщения до НЗУ ( $\rho_c$  и  $q_c$ ), равно

$$2^{N} = \sum_{i=0}^{N} C_{N}^{i},$$

где N – количество НЗУ в сегменте СП $\mathcal{I}$ .

Таким же выражением может быть описано количество строк МПВ, в которых размещаются вероятности перехода СПД в состояние, связанное с доведением квитанции о получении сообщения от НЗУ до отправителя В ( $p_{\kappa\theta}$  и  $q_{\kappa\theta}$ ), равно

$$2^{\mathbf{N}} = \sum_{j=0}^{N} C_{N}^{j} ,$$

где N – количество НЗУ в сегменте СПД.

После столбцов МПВ, содержащих вероятности перехода СПД в состояние, связанное с доведением сообщения до НЗУ ( $p_c$  и  $q_c$ ) (за исключением нулевого с толбца), следует столбец, содержащий вероятности перехода СПД в состояние, связанное с доведением квитанции о получении сообщения от НЗУ до отправителя В ( $p_{\kappa B}$  и  $q_{\kappa B}$ ). Число таких столбцов N.

Аналогично, после строк МПВ, содержащих вероятности перехода СПД в состояние, связанное с доведением квитанции о получении сообщения от НЗУ до отправителя В ( $p_{\kappa B}$  и  $q_{\kappa B}$ ) (за исключением нулевой строки), следует строка содержащая вероятности перехода СПД в состояние, связанное с доведением сообщения до НЗУ ( $p_{\epsilon}$  и  $q_{\epsilon}$ ). Число таких строк N.

Таким образом, число столбцов и строк в полученной в результате преобразования МПВ рассчитывается по формуле:

$$I=2^N+N, (3)$$

где I – количество строк и столбцов МПВ; N – количество НЗУ в сегменте СП $\mathcal{I}$ .



Состояние СПД				До	ведение	сообще	ения из	состоян	ия р <sub>0,0</sub>		квита из ЗУ	Доведен нции от , получ ообщен	одного ивших			Довед		общени гавших		ного из			кви любог пол	оведени гтанции го из дву тучивш ообщени	от /х ЗУ, их	соо	оведени бщения эследнег вшегося	до	Доведение квитанции от последнего ЗУ получившего сообщение
		чество				2 <sup>n</sup>					n	2 <sup>n</sup> +1 n							n										
		рок/ лбцов	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Доведение сообщен из состояния р <sub>0,0</sub>	ВИ	0	9C1 9C2 9C3	PC1 QC2 QC3	qc1 Pc2 qc3	qc1 qc2 Pc3	PC1 PC2 QC3	9C1 PC2 PC3	PC1 QC2 PC3	PC1 PC2 PC3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		1	q <sub>KB1</sub>	0	0	0	0	0	0	0	P <sub>KB1</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		2	q <sub>KB2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	PKB2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Доведение		3	<b>ЧКВ</b> 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	PKB3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
квитанции от одного из ЗУ, получивших		4	9KB1 9KB2	0	0	0	0	0	0	0	PKB1 9KB2	PKB1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	PKB1 PKB2	0	0	0	0	0	0
сообщение	2 <sup>n</sup>	5	9KB2 9KB3	0	0	0	0	0	0	0	0	PKB2 PKB3	PKB3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	PKB2 PKB3	0	0	0	0	0
сообщение		6	9KB1 9KB3	0	0	0	0	0	0	0	PKB1 9KB3	0	QKB1 PKB3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	PKB1 PKB3	0	0	0	0
		7	9KB1 9KB2 9KB3	0	0	0	0	0	0	0	PKB1 PKB2 PKB3	PKB1 PKB2 PKB3	9KB1 9KB2 PKB3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	PKB1 PKB2 PKB3	PKB1 PKB2 PKB3	PKB1 PKB2 PKB3	0	0	0	PKB1 PKB2 PKB3
Доведение сообщения		8	0	0	0	0	0	0	0	0	qc:	0	0	PC2 PC	PC2 QC	qc2 Pc3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
до одного из 2 оставшихся ЗУ	п	9	0	0	0	0	0	0	0	0	903	9c1 9c3	0	0	0	0	PC1 PC	PC1 QC	qc1 Pc3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
оставшихся эт	"	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	qc1 qc2	0	0	0	0	0	0	PC1 PC	PC1 QC2	qc1 Pc2	0	0	0	0	0	0	0
		11	0	0	0	0	0	0	0	0	q <sub>KB2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	PKB2	0	q <sub>KB2</sub>	0	0	0	PKB2
		12	0	0	0	0	0	0	0	0	9KB3 9KB2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9KB3 PKB2	0	PKB3 0	0	0	0	PKB3 0
Ловедение квитанции		13	0	0	0	0	0	0	0	0	q <sub>KB3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Рквз	0	0	0	0
доведение квитанции от любого из двух ЗУ,		14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	qkB1 qkB3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	PKB1 9KB3	9KB1 PKB3	0	0	0	0	PKB1 PKB3
получивших	2n+1	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	qKB1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	PKB1	0	0	0	0	0	0
сообщение		16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>ЧКВ</b> 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	рквз	0	0	0	0	0
		17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	q <sub>KB1</sub> q <sub>KB2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	QKB1 PKB2	PKB1 QKB2	0	0	0	PKB1 PKB2
		18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	q <sub>KB1</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	PKB1	0	0	0	0
		19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	q <sub>KB2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	PKB2	0	0	0	0	0
Доведение сообщения		20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	qc3	0	0	рсз	0	0	0
до последнего	n	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	qc1	0	0	PC1	0	0
оставшегося ЗУ		22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	qc2	0	0	Pc2	0
Доведение квитанции		23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	qc3	0	0	0	0	0	Рквз
от последнего ЗУ, получившего	n	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9KB1	0 9KB2	0	0	0	PKB1
сообщение		2.5		1		1						1						1				-			AKB2	,	,		PKB2

Рис. 14. Схема элементов МПВ для расчета ВВХ СПД типа «точка-многоточка» варианта «1-3»

Состояние СПД			Доведе Су	ние сообщен	ня нз состоян Су	ня р <sub>0,0</sub>	Доведение квитанции от одного из ЗУ, получивших сообщение		ние сообще одного из ставшихся С	,,	Доведение квитанции от любого из двух ЗУ, получивших сообщение	Доведение сообщения до последнего оставшегося ЗУ	Доведение квитанции от последнего ЗУ, получившего сообщение
	Количе строк/ сп		0	1 (1, 2, 3)	2 (4, 5, 6)	3 (7)	4 (8, 9, 10)	5 (11, 12, 13)	6 (14, 15, 16)	7 (17, 18, 19)	8 (20, 21, 22)	9 (23, 24, 25)	10 (26)
Доведение сообщения из состояния р <sub>0.0</sub>	0	C°	<b>9</b> C1 <b>9</b> C2 <b>9</b> C3	PC1QC2QC3 <sup>+</sup> QC1PC2QC3 <sup>+</sup> QC1 QC2 PC3	PC1PC2PC3 <sup>+</sup> 9C1PC2PC3 <sup>+</sup> PC1 9C2 PC3	PC1PC2 PC3	0	0	0	0	0	0	0
Доведение	1 (1, 2, 3)	C <sub>N</sub>	q <sub>KB1</sub> +q <sub>KB2</sub> + q <sub>KB3</sub>	0	0	0	p <sub>KB1</sub> +p <sub>KB2</sub> +p <sub>KB3</sub>	0	0	0	0	0	0
квитанции от одного из ЗУ, получивших	2 (4, 5, 6)		9KB1 9KB2 <sup>+</sup> 9KB29KB3 <sup>+</sup> 9KB19KB3	0	0	0	PKB1 QKB2 + QKB1 PKB2 + PKB2 QKB3 + QKB2 PKB3 + PKB1 QKB3 + QKB1 PKB3	0	0	0	PKB1PKB2 <sup>+</sup> PKB2PKB3 <sup>+</sup> PKB1PKB3	0	0
сообщение	3 (7)		<b>9</b> KB1 <b>9</b> KB2 <b>9</b> KB3	0	0	0	PKB1 9KB2 9KB3 <sup>+</sup> 9KB1 PKB2 9KB3 <sup>+</sup> 9KB1 9KB2 PKB3	0	0	0	PKB1PKB2PKB3 <sup>+</sup> QKB1PKB2PKB3 <sup>+</sup> PKB1PKB2PKB3	0	Ркв1Ркв2Ркв3
Доведение сообщения до одного из 2 оставшихся ЗУ	4 (8, 9,	10)	0	0	0	0	9c29c3 <sup>+</sup> 9c19c3 <sup>+</sup> 9c19c2	Pc2Pc3 <sup>+</sup> Pc2Qc3 <sup>+</sup> Qc2Pc3	PC1PC3 <sup>+</sup> PC1QC3 <sup>+</sup> QC1PC3	PC1PC2 <sup>+</sup> PC1QC2 <sup>+</sup> QC1PC2	0	0	0
	5 (11,12,13)	C <sub>N</sub>	0	0	0	0	qкв2qкв3 <sup>+</sup> qкв2 <sup>+</sup> qкв3	0	0	0	PKB2 <sup>Q</sup> KB3 <sup>+</sup> QKB2PK B3 <sup>+</sup> PKB2 <sup>+</sup> PKB3	0	PKB2PKB3
квитанции от любого из двух ЗУ, получивших	6 (14,15,16)		0	0	0	0	qкв1qкв3 <sup>+</sup> qкв1 <sup>+</sup> qкв3	0	0	0	Ркв19кв3 <sup>+</sup> 9кв1Рк в3 <sup>+</sup> Ркв1 <sup>+</sup> Ркв3	0	Ркв1Ркв3
сообщение	7 (17, 18, 19)		0	0	0	0	q <sub>КВ1</sub> q <sub>КВ2</sub> +q <sub>КВ1</sub> + q <sub>КВ2</sub>	0	0	0	qкв1ркв2 <sup>+</sup> ркв1qк в2 <sup>+</sup> ркв1 <sup>+</sup> ркв2	0	Ркв1Ркв2
Доведение сообщения до последнего оставшегося ЗУ	8 (20, 2	1, 22)	0	0	0	0	0	0	0	0	qc1 <sup>+</sup> qc2 <sup>+</sup> qc3	PC1 <sup>+</sup> PC2 <sup>+</sup> PC3	0
Доведение квитанции от третьего ЗУ, получившего сообщение	9 (23,24 25)	C <sub>N</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	q <sub>квз</sub> +q <sub>кв1</sub> +q <sub>кв2</sub>	0	Ркв1 <sup>+</sup> Ркв2 <sup>+</sup> Ркв3
	10 (	26)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

**Рис. 15.** Схема МПВ для расчета ВВХ СПД типа «точка-многоточка» варианта «1-3», полученной в результате преобразования

Такими же выражениями описывается число столбцов и строк в полученных аналогичным образом МПВ для СП $\mathcal I$  типа «точка-многоточка» ва-

риантов «1-2», «1-4», «1-5» и так далее. Это существенно уменьшает размерность МПВ и упрощает нахождение ВВХ ИО в рассматриваемых СПД.



Закономерности нахождения элементов матриц переходных вероятностей в СПД с соединениями «точка-многоточка» при различном качестве каналов связи

Рассмотрим закономерности нахождения вероятностей перехода СП $\mathcal{I}$  в различные состояния.

Для этого введем производящие функции  $f(\mathbf{z}), f_s(\mathbf{z}), f_h(\mathbf{z})$ :

$$f(z) = \prod_{i=1}^{N} (q_{ci} + p_{ci}z) = K_0 + K_1z + K_2z^2 + \dots + K_Nz^N$$
 (4)

$$f_s(z) = \prod_{i=1}^{s} (q_{ci} + p_{ci}z) = KS_0 + KS_1z + KS_2z^2 + \dots + KS_sz^s$$
 (5)

$$f_h(z) = \prod_{i=1}^h (q_{ci} + p_{ci}z) = LH_0 + LH_1z + LH_2z^2 + \dots + LH_hz^h.$$
(6)

В выражениях (4)–(6) z является переменной производящей функции, N – количество НЗУ (норма управляемости), S и H – параметры, изменяемые от 1 до N-1.

Коэффициент К определяется, исходя из нормы управляемости СПД. Например, для СПД с N=3 выражение (4) будет иметь вид

$$f(z) = (q_{c1} + p_{c1}z)(q_{c2} + p_{c2}z) = (q_{c1}q_{c2})z^0 + (p_{c1}q_{c2} + q_{c1}p_{c2})z^1 + (p_{c1}p_{c2})z^2 = K_0 + K_1z + K_2z^2.$$

В представленной на *рисунке 3* МПВ значение  $p_{0.0}$  определятся выражением:

$$p_{0,0} = K_0 = \prod_{i=1}^{N} q_{ci} \tag{7}$$

Следующий ненулевой элемент главной диагонали МПВ ( $p_{4,4}$ ) определяется выражением:

$$p_{c_N^2+1,c_N^2+1} = \sum_{j=1}^N \left( \prod_{k=1}^j M_{q_k} \right), \tag{8}$$

где  $M_{qc}$  - множество сочетаний из элементов вектора  ${\pmb Q}_{\pmb c}={\pmb 1}-{\pmb P}_{\pmb c}=\left[{\pmb q}_{\pmb c\pmb 1},{\pmb q}_{\pmb c\pmb 2}\dots {\pmb q}_{\pmb c\pmb N}\right]$  по (N-1).

Таким образом, для всех элементов главной диагонали МПВ справедливо утверждение, что при  $\boldsymbol{i} = \overline{\mathbf{1,N-1}} \text{ и } \boldsymbol{x_i} = \boldsymbol{x_{i-1}} + \boldsymbol{C_N^{\left[\frac{1}{2}\right]+1}}; \text{ } \mathbf{x_0} \! = \! \mathbf{1};$ 

$$p_{x_i,x_i} = \sum_{j=1}^{N} (\prod_{k=1}^{j} M_{q_k}),$$
 (9)

где  $M_{qc}$  - множество сочетаний из элементов вектора  $m{Q_c} = \mathbf{1} - \mathbf{P_c} = \begin{bmatrix} m{q_{c1}}, m{q_{c2}} & \dots & \mathbf{q_{cN}} \end{bmatrix}$  по (N-i).

Значения вероятностей 0-й строки и 0-го столбца МПВ при  $\mathbf{i} = \mathbf{\overline{1, C_N^1}}$  определяются выражениями:

для строки 
$$\boldsymbol{p}_{0,i} = \boldsymbol{K}_i$$
, (10)

для столбца 
$$p_{i,0} = \sum_{j=1}^{c_N^i} (\prod_{k=1}^j M_{qkB}),$$
 (11)

где  $M_{_{\!\mathit{qKB}}}\,$  – число сочетаний из элементов вектора

$$Q_{\text{KE}} = 1 - P_{\text{KE}} = [q_{\text{KE}1}, q_{\text{KE}2} \dots \dots q_{\text{KE}N}] \text{ 110 } i.$$

Из  $\it puсунка~3~$  видно, что  $\it p_{1,4}$  определяется общим выражением вида:

$$p_{1,C_{N}+1} = \sum_{i=1}^{N} p_{KBi}$$
 (12)

 $p_{2,4}$  и  $p_{3,4}$  находятся из общего выражения вида:

$$p_{i,C_N^{1+1}} = \sum_j M_j(LH_1)$$
 при  $i = \overline{2,C_N^{1}+1}$ , (13)

где  $M_i(LH_1)$  – множество сочетаний при  $h = \overline{\mathbf{2,N}}$ .

Для  $p_{5,4}$  и  $p_{6,4}$  справедливо следующее выражение:

$$p_{i,C_N^1+1} = \sum_{h=1}^{N-1} \sum_{k=1}^h M_k(LH_0)$$
 при  $i = \overline{C_N^1+1,2C_N^1+2}$  (14)

где  $M_k(LH_0)$  – множество сочетаний при  $k = \overline{1,h}$ ;

Обобщая выражения (13) и (14), целесообразно заключить, что при

$$i = \overline{x_{\text{H}l}, x_{\text{K}l}}, x_{\text{H}l} = x_{\text{K}(l-1)} + 2, \ x_{\text{K}l} = x_{\text{H}l} + C_N^{\left[\frac{l}{2}\right]+1} - 1,$$

$$x_{\kappa 1} = 2C_N^1 + 2 \text{ m } j = \overline{y_{\kappa l}, y_{\kappa l}}, y_{\kappa l} = y_{\kappa (l-1)} + 2,$$

$$y_{\kappa l} = x_{\kappa l} + C_N^{\left[\frac{l}{2}\right]+1} - 1, \ y_{\kappa 1} = C_N^1 + 1, l = \overline{2, (N-1)}$$

$$p_{i,j} = \sum_{h=1}^{N-1} \sum_{k=1}^{h} M_k(LH_l), \tag{15}$$

где  $M_k(LH_l)$  – множество сочетаний при  $k = \overline{1,h}$ .

Именно выражение (15) использовано при нахождении элементов  $p_{2,8}$  -  $p_{7,8}$  рассматриваемой МПВ.

Для значений  $p_{4,5}$ ,  $p_{4,6}$  и  $p_{4,7}$  при  $i = \overline{C_N^1 + 2,2C_N^1 + 1}$  справедливо следующее выражение

$$p_{C_N^{1+1,i}} = \sum_{j=1}^{N-1} KS_{jx},$$
 (16)

где  $KS_{jx}$  – коэффициенты при степенях z производящей функции  $f_s(z)$  при s=N-1,  $x=\overline{1,N}$ .

Обобщив выражение (16) на случай МПВ большей размерности, получим:

$$p_{x_{i},-2,i} = \sum_{j=1}^{N-1} KS_{jx}$$
 (17)

при 
$$i = \overline{x_{nl}, x_{nl}}, x_{nl} = x_{n(l-1)} + 2, x_{nl} = x_{nl} + C_{n}^{\left[\frac{l}{2}\right]+1} - 1, x_{nl} = 2C_{n}^{1} + 1, l = 2C_{n}^{1} + 1, l = 2C_{n}^{1} + 1$$

где  $KS_{jx}$  – коэффициенты при степенях z производящей функции  $f_s(z)$  при  $s=N-l, \ x=\overline{1,N}$ .

Вероятности  $p_{10,3}, p_{10,5}, p_{10,6}$  и  $p_{10,7}$  рассчитываются следующим образом:

$$p_{i,2}N_{+N-1} = \prod_{j=1}^{l} (M_{p_{KL}})_{i}$$
 (18)

где  $M_{p_{\mathit{KB}}}$  - множество сочетаний из элементов множества  $((p_{\mathit{KB}} \cup q_{\mathit{KB}}) - (p_{\mathit{KB}} \cap q_{\mathit{KB}}))$  при

$$\begin{split} i &= \overline{x_{\text{m}l}, x_{\text{k}l}}, \ x_{\text{m}l} = x_{\text{k}(l-1)} + 2, \ x_{\text{k}l} = x_{\text{m}l} + \\ &+ C_N^{\left[\frac{l}{2}\right] + 1} - 1, \ x_{\text{k}1} = 2C_N^1, \ l = \overline{2, (N-2)}. \end{split}$$

Это же выражение справедливо и для общего случая с МПВ большей размерности. Ненулевые значения вероятностей 8-й строки возможно синтезировать, используя выражения:

$$p_2 N_{+N-3,2} N_{+N-3} = \sum_{i=1}^{N} q_{ci};$$
 (19)

$$p_2 N_{+N-3,2} N_{+N-2} = \sum_{i=1}^{N} p_{ci};$$
 (20)

А ненулевые значения вероятностей 9-й строки получатся при использовании выражений:

$$p_{2^{N}+N-2,2^{N}+N-3} = \sum_{i=1}^{N} q_{\kappa \kappa i};$$
 (21)

$$p_{2^{N}+N-2,2^{N}+N-1} = \sum_{i=1}^{N} p_{\text{KB}i}$$
 (22)

Единственный ненулевой элемент последней (10-й) строки содержится в последнем (10-м) столбце МПВ и равен 1, то есть всегда справедливо следующее выражение:

$$p_2 N_{+N-1,2} N_{+N-1} = 1$$
 (23)

Рисунок 16 иллюстрирует закономерности синтеза элементов МПВ для нахождения ВВХ с помощью КМЦ для СПД с большой нормой управляемости.

В дополнение к изложенному важно добавить, что сумма вероятностей в 1-й,  $\mathbf{C}_N^1$  –й и последней строках равна 1, а во всех остальных – N, где N – количество НЗУ в рассматриваемой иерархической СП $\mathcal{A}$ .

В связи с этим алгоритм оценки ВВХ, изложенный в [1], целесообразно дополнить с учетом результатов проведенных исследований. В качестве одного из путей модернизации указанного метода [1] предлагается нормировать соответствующие строки МПВ путем поэлементного деления этих строк на N. Матрица шагов перехода строится по тем же правилам, что и ранее [1].

#### Расчет вероятностно-временных характеристик доведения сообщений различными методами

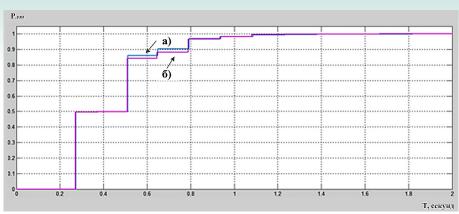
Рассчитаем ВВХ СПД варианта «1-3» при длине сообщения (повтора сообщения), передаваемого звеном В  $L_n$ =120 бит и длине квитанции  $L_{\kappa \theta}$ =56 бит. Скорости передачи информации во всех трех каналах связи  $V_{nu}$ =1200 бит/с.

Вероятности доведения сообщения в КС при этом для В- $AC_1$   $PC_1$ =0,8, для В- $AC_2$   $PC_2$ =0,9, для В- $AC_3$  - $PC_3$ =0,95, и вероятности доведения квитанций  $P_{KB1}$ =0,85,  $P_{KB2}$ =0,9 и  $P_{KB3}$ =0,95 соответственно.

			(10)	(13)	(12)		(16)			(15)		(19)
		0	1	2	3	4	5	6	7		9	0
	0	q <u>c1<b>qe:q</b></u> c3	P <sub>C1</sub> Q <sub>C2</sub> Q <sub>C3</sub> + Q <sub>C1</sub> P <sub>C2</sub> Q <sub>C3</sub> + Q <sub>C1</sub> Q <sub>C2</sub> P <sub>C3</sub>	p <sub>C1</sub> p <sub>C2</sub> q <sub>C3</sub> + q <sub>C1</sub> p <sub>C2</sub> p <sub>C3</sub> + p <sub>C1</sub> q <sub>C2</sub> p <sub>C3</sub>	p <sub>C1</sub> p <sub>C2</sub>	0	0	0	0		0	þ
(7)	1	q <sub>K61</sub> +q <sub>K62</sub> +q <sub>K63</sub>	0	0	0	р <sub>кв1</sub> +р <sub>кв2</sub> +р <sub>кв3</sub>	0	0	0	0	0	0
	2	Чквз Чкв2+ Чкв2Чкв3+ Чкв1Чквз	0	0	0	жв1 9кв2 + 9кв1 9кв2 + ркв2 9кв3 + 9кв2 9кв3 + 9кв1 9кв3 + 9кв1 9кв3	0	0	0	р <sub>кв1</sub> р <sub>кв2</sub> + р <sub>кв2</sub> р <sub>кв3</sub> + р <sub>кв1</sub> р <sub>кв3</sub>	0	o
	3	<b>ЧкезЧке2Чке</b> з	0	0	o	Рива Чива Чива + Чива Рива Чива + Чива Чива Рива -	0	\\\o	0	Ркв1Ркв2Чкв3+ Чкв1Ркв2Ркв3+ Ркв1Чкв2Ркв3	  -  -  -	<b>Р</b> кв1 <b>Р</b> кв2 <b>Р</b> кв3
(11)	4	0	0	0	0	q <sub>C2</sub> q <sub>C3</sub> +q <sub>C1</sub> q <sub>C3</sub> + q <sub>C1</sub> q <sub>C2</sub>	p <sub>C2</sub> p <sub>C3</sub> + p <sub>C2</sub> q <sub>C3</sub> + q <sub>C2</sub> p <sub>C3</sub>	p <sub>C1</sub> q <sub>C3</sub> +	p <sub>C1</sub> p <sub>C2</sub> + p <sub>C1</sub> q <sub>C2</sub> + q <sub>C1</sub> p <sub>C2</sub>	I	0	0
	5	0		0	0	qкв2qкв3+ qкв2+qкв3	0	0	0	р <sub>кв2</sub> q <sub>кв3</sub> +q <sub>кв2</sub> р <sub>кв3</sub> + р <sub>кв2</sub> +р <sub>кв3</sub>	0	ркварквз
(8)	6	0	0	0	0	q <sub>кв1</sub> q <sub>кв3</sub> +q <sub>кв1</sub> + q <sub>кв3</sub>	0	0	0	I p <sub>KB1</sub> q <sub>KB3</sub> +q <sub>KB1</sub> p <sub>KB3</sub> +	0	<b>р</b> кв1 <b>р</b> кв3
	7	0	0	0	9/	qкв1 <b>q</b> кв2+qкв1+ qкв2	0	0	0	qкв1ркв2+ркв1qкв2+ ркв1+ркв2	0	<b>р</b> кв1 <b>р</b> кв2
	8	Ö	0	0	0	0	0	0	0	q <sub>C1</sub> +q <sub>C2</sub> +q <sub>C3</sub>	p <sub>C1</sub> +p <sub>C2</sub> +p <sub>C3</sub>	0
	9	0	0	9//	0	0	0	0	0//	q <sub>квз</sub> +q <sub>кв1</sub> +q <sub>кв2</sub>	0 1	<b>р</b> кв1+ <b>р</b> кв2+ <b>р</b> кв3
	10	0	0	// 0	0	0	0	0	//5	0//	0/	1
			(14)	(15)				(9	) (1	19), (20)	21), (22)	(23)

**Рис. 16.** Схема синтеза значений элементов МПВ для расчета ВВХ СПД типа «точка-многоточка» варианта «1-3»





**Рис. 17.** ВВХ доставки сообщений для СПД с 3 НЗУ, рассчитанные разными методами

Результаты расчета представлены на *рисунке 17*. При этом кривая а) получена изложенными в [1, 2, 5, 6] методами, а кривая б) – с применением описанного выше подхода.

Из анализа зависимостей, представленных на рисунке 17, следует вывод об итерационном накоплении ошибки при расчете вероятности доведения по предложенному в настоящем исследовании методу. При этом точки по оси абсцисс в оценках ВВХ по классическому [1, 2, 5, 6] и модернизированному алгоритмам совпадают с достаточной точностью.

Поэтому продолжение исследований в целях совершенствования подхода, изложенного в настоящей статье, является актуальным.

#### Выводы

- 1. Приведенный в статье подход к оценке BBX доставки сообщений в сетях передачи данных с соединениями «точка-многоточка» при различном качестве каналов связи методом конечных марковских цепей упрощает синтез МПВ и МШП.
- 2. Проведенная оценка точности временных параметров показала несущественный вклад динамики среднего шага перехода в итоговую погрешность вычислений.
- 3. Выполненные расчеты показывают незначительное расхождение найденных ВВХ с результатами, полученными с применением классических методов [1, 2, 5, 6]. Причина расхождения уточняется.
- 4. Целесообразно продолжение исследований в целях совершенствования подхода к расчету ВВХ СПД с различным количеством НЗУ при неоднородных по качеству КС и обобщения его для любого конечного количества звеньев.

- 1. Цимбал В.А. Информационный обмен в сетях передачи данных. М.: «Вузовская книга», 2014. 144 с.
- 2. Цимбал В.А., Вальваков А.М., Попов М.Ю. Анализ характеристик конечных марковских цепей при разных шагах переходов // Известия Института инженерной физики, 2014. №1(31). С. 53-56.
- 3. Суздалев А.В. Сети передачи информации АСУ. М.: Радио и связь, 1983.
- 4. Цимбал В.А., Климов В.В., Устинов И.А. Оценивание связности информационной сети АСУ с рокадными связями на основе связности базового сегмента // Информация и космос, 2008. №3. С. 17-20.
- 5. Цимбал В.А., Косарева Л.Н., Яременко Е.А., Кулачко И.С., Москвин А.А. Исследование характеристик информационного обмена соединений «точка-многоточка» с протоколом Х.21 при различном качестве каналов связи // Труды ХХХV Всероссийской научно-технической конференции «Проблем эффективности и безопасности сложных технических и информационных систем. Сборник № 6. ВА РВСН им. Петра Великого (филиал в г.Серпухов), 2016. С. 77-85.
- 6. Цимбал В.А., Москвин А.А., Довгополая Е.А. Моделирование процесса информационного обмена в иерархических сетях передачи данных с соединениями «точка-многоточка» при различном качестве каналов связи // Труды Всероссийской конференции (с международным участием) «Радиоэлектронные средства получения, обработки и визуализации информации» РСПОВИ-2016. Доклады. Серия: научные всероссийские конференции (выпуск VI) Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С Попова. Москва, 2016. С. 292-300.



# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ



101010101 01 (0010

УДК 519.725

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ОШИБОК НА ОСНОВЕ КОДА С МИНИМАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ И АППАРАТУРНОЙ ИЗБЫТОЧНОСТЬЮ

METHODICAL APPROACH IMPROVE THE RELIABILITY OF OPERATION STORAGE AND TRANSMISSION OF INFORMATION WITH A MINIMUM OF INFORMATION AND INSTRUMENTAL REDUNDANC

## Денис Александрович Корсунский

научный сотрудник МОУ «ИИФ» Адрес: 142210, Московская обл.,

г. Серпухов, Большой Ударный пер., д.1а

Тел.: +7(4967) 35-31-93 E-mail: info@iifrf.ru

#### Аннотация

Предложен методический подход построения алгебраического линейного кода для обнаружения ошибок в устройствах хранения и передачи информации, который обеспечивает высокое значение вероятности обнаружения одиночных и двойных ошибок ( $P_{obn,1}$ =1,  $P_{obn,2}$ >0,9) при сокращении информационной и аппаратурной избыточности. Получены математические выражения для оценки параметров разработанного кода. Проведена оценка аппаратурных затрат на построение кодирующего и декодирующего устройства. Осуществлена сравнительная оценка достоверности функционирования, информационной и аппаратурной избыточности, необходимой для построения запоминающего устройства, контролируемого кодом Хэмминга на основе предлагаемого методического подхода. В результате сравнения установлено, что использование предлагаемого методического подхода обеспечивает:

- сокращение аппаратурных затрат на построение кодирующего и декодирующего устройства;
- сокращение информационной избыточности на два контрольных разряда;
- повышение достоверности функционирования ЗУ на большем временном участке его эксплуатации.

**Ключевые слова:** корректирующий алгебраический линейный код, корректирующий циклический код, одиночные и двойные ошибки, информационные разряды, контрольные разряды, синдром ошибки.

#### Summary

The methodical approach to the construction of an algebraic linear code to detect errors in the storage and transmission of information, which provides the high value of the probability of detection of single and double faults ( $R_{obn1}$ =1,  $R_{obn2}$ >0.9), while reducing redundancy of information and instrumental. The mathematical expression for the estimation of the parameters of the developed code. The estimation of costs for the construction of hardware encoding and decoding device. The comparative assessment of the reliability of operation, information and instrumental redundancy required for the construction of a storage device controlled Hamming code based on the proposed methodological approach. The comparison found that the use of the proposed methodological approach provides:

- reduce hardware expenses on construction of encoders and decoders;
- reducing information redundancy in the two check digits;
- increasing the reliability of the memory operation on a larger portion of its operating time.

**Keywords:** adjustment algebraic linear code correcting cyclic code, single and double errors, data bits, check digits, the error syndrome.

#### Введение

Современный мир характеризуется широким внедрением информационных технологий, предназначенных для сбора, анализа и обработки информации с целью формирования управленческих решений.

Выполнение данных операций возлагается на ЭВМ, которые являются функциональным ядром систем управления и обработки информации (СУОИ).

Устройства хранения и передачи информации (УХПИ) являются наиболее важными функциональными узлами ЭВМ и представляют со-



бой наиболее динамичную область развития микроэлектроники.

Так как эффективность функционирования СУОИ в значительной степени характеризуется достоверностью информации, которая обрабатывается в УХПИ, то особую актуальность приобретают вопросы обеспечения достоверности функционирования данных систем [1, 2].

Опыт эксплуатации УХПИ показывает, что наиболее вероятным событием является возникновение одиночных и двойных ошибок (на одиночные ошибки приходится до 80%, на двойные ошибки до 20-25% и на ошибки прочей кратности до 2%) [3, 4, 5].

В настоящее время в рассматриваемых системах используется целый ряд методов обнаружения ошибок. Анализ существующих методов обнаружения ошибок в УХПИ показывает, что структурные методы обнаружения ошибок, такие как: мажоритарный метод, дублирование, парафазная логика, перекрестная логика обладают высокой обнаруживающей способностью, высоким быстродействием, однако требуют больших аппаратурных затрат [3].

Использование алгебраических линейных кодов с d=3, позволяет обнаруживать одиночные и двойные ошибки, сократить аппаратурные затраты резервного оборудования (требуется 30% от исходных аппаратурных затрат), однако его использование приводит к неоправданной информационной избыточности [3].

Для сокращения информационной избыточности, кода, обнаруживающего одиночные и двойные ошибки, может использоваться алгебраический линейный код с двумя контрольными разрядами, проверочная матрица которого имеет вид [6, 7, 8]:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & \dots & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & \dots & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где два последних столбца соответствуют контрольным разрядам.

В аналитическом виде, значений двух контрольных разрядов формирование по правилу:

$$r_1 = x_1 \oplus x_2 \oplus y_1 \oplus y_2 \oplus \dots \oplus z_1 \oplus z_2,$$
  
 $r_2 = x_2 \oplus x_3 \oplus y_2 \oplus y_3 \oplus \dots \oplus z_2 \oplus z_3.$ 

Представленный линейный код обнаруживает 100% одиночных ошибок и, в зависимости от числа информационных разрядов, следующий процент двойных ошибок:

- в шестиразрядном двоичном коде  $P_{O6}$ =75%;
- в девятиразрядном двоичном коде  $P_{O9}$  = 72,73%;
- в двенадцатиразрядном  $P_{O12}$ =71,43%;
- в пятнадцатиразрядном  $P_{O15}$ =70,58%;

- в восемнадцатиразрядном  $P_{O18}$ =70%;
- в двадцатиодноразрядном  $P_{O21}$  = 69,56%;
- в двадцатичеты<br/>рехразрядном  $P_{O24}$  = 69,23%;
- в двадцатисемиразрядном  $P_{O27}$ =68,66%,;
- в шестидесятиразрядном  $P_{O60}$  =67,74%.

Недостатком данного кода является низкая обнаруживающая способность двойных ошибок.

Таким образом, существует противоречие, с одной стороны, между необходимостью повышения обнаруживающей способности встроенных средств контроля и, с другой стороны, ростом информационной и аппаратурной избыточности, что приводит к снижению их эффективности.

Если использовать кодовый контроль для обнаружения одиночных и двойных ошибок, то достоверность определяется выражением

$$D_{\Phi}(t) = \left[ P_{MCX}(t) P_{K}(t) + P_{1} P_{OEH1}(1 - P_{MCX}(t) P_{K}(t)) + P_{2} P_{OEH2}(1 - P_{MCX}(t) P_{K}(t)) \right] P_{PO}(t),$$
(1)

где  $P_{HCX}\left(t\right)$  – вероятность безотказной работы исходной схемы;

 $P_K(t)$  – вероятность безотказной работы схемы контроля (схемы кодирования и элементов памяти для хранения значений контрольных разрядов);

 $P_{PO}(t)$  – вероятность безотказной работы решающего органа (схемы формирования значений контрольных разрядов относительно считанной информации и схемы сравнения переданных и сформированных значений контрольных разрядов – декодирующего устройства, обнаруживающего ошибки);

 $P_{oбn1}$  – вероятность обнаружения одиночных ошибок;  $P_{oбn2}$  – вероятность обнаружения двойных ошибок;  $P_1$  – вероятность возникновения одиночной ошибки;  $P_2$  – вероятность возникновения двойной ошибки.

Для разрешения выявленного противоречия необходимо повышать обнаруживающую способность средств контроля или сокращать аппаратурные затраты (повышать безотказной работы средств контроля) или одновременно улучшать данные показатели.

Таким образом, существует необходимость решения научной задачи, заключающейся в разработке по разработке научно-методического аппарата повышения достоверности функционирования устройств хранения и передачи информации на основе использования алгебраического кода при сокращении информационной и аппаратурной избыточности:

$$D_{\phi}(t) \succ D_{K}(t) | r \le r_{K}; C \le C_{K}; P_{OBH2} \succ P_{OBH2M},$$
 (2)



где:  $D_{\Phi}(t)$  – достоверность функционирования устройства хранения информации, контролируемого на основе предлагаемого методического аппарата;

 $D_K(t)$  — достоверность функционирования устройства хранения информации, контролируемого алгебраическим линейным кодом с кодовым расстояние d=3;

r — информационная избыточность при использовании предлагаемого методического аппарата;  $r_{\kappa}$  — информационная избыточность при использовании алгебраического линейного кода, обнаруживающего одиночные и двойные ошибки;

 $\widetilde{C}$  – аппаратурные затраты при использовании предлагаемого методического аппарата;

 $C_K$  – аппаратурные затраты при использовании алгебраического линейного кода, обнаруживающего одиночные и двойные ошибки;

 $P_{OBH2M}$ =0,75 – вероятность обнаружения двойной ошибки линейным кодом с двумя контрольными разрядами.

## Правила построения корректирующих кодов, обнаруживающих одиночные и двойные ошибки при минимальной избыточности

**Правило 1.** Двоичное слово Y, содержащие k информационных символов, разбивается на m=k/b информационных блоков (под информационным блоком будем понимать число информационных разрядов, не превышающих значение b). Пусть b кратно k.

Полученные информационные блоки представляют в виде информационной матрицы:

$$y_{m1} \ y_{m2} \cdots \ y_{mb}$$
 $y_{21} \ y_{22} \cdots \ y_{2b}$ 
 $y_{11} \ y_{12} \cdots \ y_{1b}$ 

В результате имеем информационную матрицу, имеющую m-строк и b-столбцов. Пусть:  $z=(b+m),\ m\geq b.$ 

Для обнаружения любой комбинации двойных ошибок необходимо и достаточно, чтобы все столбцы проверочной матрицы были различны.

Свойство 1. Уменьшение проверочных символов в коде Хэмминга до значения  $r^*=r$ -i, при сохранении длины п непременно ведет к образованию повторяющихся столбцов в проверочной матрице и, как следствие, невозможности обнаружения некоторой части двойных ошибок.

**Правило 2.** Минимизация числа контрольных разрядов (при которой сохраняется  $P_{OBH2} > 0.75$ ) осуществляется логарифмированием суммы строк и столбцов информационной матрицы:

В этом случае число контрольных разрядов, определяется выражением:

$$r*=log_2z$$
.

**Правило 3.** Для построения минимизированного кода с  $r^*=r-2$  проверками, обнаруживающего все одиночные ошибки и не обнаруживающего минимальное число двойных ошибок, необходимо построить проверочную матрицу, включающую столбцы всех ненулевых векторов длины  $r^*$ , а для получения длины п дополнить ее  $\beta$  столбцами.

<u>Правило 4.</u> Для сокращения аппаратурных затрат на построение декодирующего устройства необходимо дополнять столбцы проверочной матрицы, столбцами содержащими наименьшее количество единиц.

**Свойство 2.** Если п делится без остатка, количество повторений одного и того же столбца в проверочной матрице равно:

$$\alpha = \frac{n}{2^{r^*} - 1}.\tag{3}$$

Свойство 3. Одинаковые столбцы будут давать  $\begin{pmatrix} \alpha \\ 2 \end{pmatrix}$  – необнаруженных двойных ошибок.

**Свойство 4.** Если при делении n имеем остаток  $\beta$ , то имеем  $\beta$  столбцов, у которых число повторений равно  $\alpha+1$ , для которых число необнаруженных двойных ошибок равно

$$\binom{\alpha+1}{2}$$
.

<u>Свойство 5.</u> Число необнаруженных двойных ошибок для кода длины n определяется выражением:

$$\varphi = \begin{pmatrix} \alpha \\ 2 \end{pmatrix} \left( 2^{r^*} - 1 - \beta \right) + \beta \begin{pmatrix} \alpha + 1 \\ 2 \end{pmatrix}. \tag{4}$$

Следовательно, вероятность появления необнаруженных комбинаций кода составляет:

$$P_e = \frac{\varphi}{\binom{n}{2} + n}.$$
 (5)

Рассмотрим построение кода 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 Н для рассматриваемого кода имеет вид:

Проверки для формирования значений контрольных разрядов определяются выражением:

$$\begin{split} & \mathbf{r}_1 \ = \ \mathbf{y}_3 \oplus \mathbf{y}_6 \oplus \ \mathbf{y}_7 \oplus \mathbf{y}_8 \oplus \mathbf{y}_9 \oplus \mathbf{y}_{10} \oplus \ \mathbf{y}_{11} \,; \\ & \mathbf{r}_2 = \ \mathbf{y}_2 \oplus \mathbf{y}_4 \oplus \ \mathbf{y}_5 \oplus \mathbf{y}_8 \ \oplus \mathbf{y}_9 \oplus \mathbf{y}_{10} \oplus \mathbf{y}_{11} \,; \\ & \mathbf{r}_3 = \ \mathbf{y}_1 \oplus \mathbf{y}_4 \oplus \mathbf{y}_5 \oplus \mathbf{y}_6 \oplus \mathbf{y}_7 \oplus \mathbf{y}_{10} \oplus \ \mathbf{y}_{11} \oplus \mathbf{y}_{12} \,. \end{split}$$

Вероятность обнаружения двойных ошибок составляет  $P_{OEH2}$ =0,915.

Таким образом, при кодировании двенадцати информационных разрядов предлагаемым методом, для обнаружения одиночных и двойных ошибок потребует три контрольных разряда.

Выразим аппаратурные затраты через двухвходовые логические элементы. Если накопитель ЗУ содержит *М* двоичных кодовых наборов и учитывая, что для хранения значения одного разряда требуется один элемент памяти (триггер, включающий четыре простейших логических элемента) и два логических элемента И ( для записи и считывания информации), то вероятность безотказной работы накопителя ОЗУ по одному выходу определяется выражением:

$$P(t) = e^{-6M\lambda(t)} \tag{6}$$

где  $\lambda(t) = 10^{-7t} - 10^{-10t} \frac{1}{q}$  — интенсивность отказа одного логического элемента.

Допустим, накопитель ОЗУ содержит одну тысячу 12-разрядных двоичных слов (МОЗУ= 1000). Вероятность безотказной работы ОЗУ (вероятность безотказной работы исходной схемы) составит:

$$P_{O3V}(t) = e^{-6 \times 1000 \times 12 \times \lambda(t)}$$
 (7)

При использовании предлагаемого методического аппарата аппаратурные затраты кодирующего устройства составят 19 сумматоров по  $mod\ 2$ .

Аппарата аппаратурные затраты декодирую-

щего устройства составят 22 сумматора по  $mod\ 2$  (19 сумматоров по  $mod\ 2$  для формирования значений контрольных разрядов относительно считываемых информационных разрядов, и 3 сумматора по  $mod\ 2$  для сравнения переданных и сформированных контрольных разрядов). Итого -41 сумматор по  $mod\ 2$ .

С учетом того, что для построения одного сумматора по mod 2 требуется четыре простейших логических элемента, аппаратурные затраты на построение кодирующего устройства составят 76 л.э., а декодирующего устройства (решающего органа) 88 л.э.

В этом случае вероятность безотказной работы схемы контроля ОЗУ по одному выходу (при условии, что для формирования значения одного контрольного разряда, требуется 6 сумматоров по  $mod\ 2\ (24\ л.э.)$  и М элементов памяти для хранения его значения в накопителе) составит:

$$P_{1O3Y}(t) = e^{-6024 \times \lambda(t)}$$
 (8)

Так как схема контроля содержит три контрольных разряда, то вероятность безотказной работы схемы контроля составит:

$$P_{K.O3V}(t) = e^{-6024 \times \lambda(t) \times 3}$$
 (9)

Вероятность безотказной работы решающего органа составит:

$$P_{PO}(t) = e^{-88 \times \lambda(t)}.$$
 (10)

При условии, что вероятность возникновения одиночной ошибки  $P_1$ =0,8, а вероятность возникновения двойной ошибки  $P_2$ =0,2, достоверность функционирования ОЗУ определим используя выражения:

$$D_{\Pi P E \mathcal{A}}(t) = \begin{bmatrix} P_{O3V}(t) P_{K = O3V}(t) + 0.8(1 - P_{O3V}(t) P_{K = O3V}(t)) + 0.2 \times \\ \times 0.915(1 - P_{O3V}(t) P_{K = O3V}(t)) \end{bmatrix} P_{PO}(t)$$
(11)

Проведем оценку аппаратурных затрат на построение ОЗУ с обнаружением одиночных двойных ошибок на основе кода Хэмминга (декодирующее устройство используется только для обнаружения ошибок).

Для обеспечения кодового расстояния d=3 (условие коррекции одиночной ошибки или обнаружения одиночных и двойных ошибок) количество контрольных разрядов r=n-k определяется из следующего неравенства:

$$2^{r-1} < 1 + k + r \le 2^r$$
, или  $r = \lceil \log_2(n+1) \rceil$  (12)

Для построения данного кода построим та-



блицу формирования множеств по Хэммингу (ma-6лица 1) для 5 основных контрольных разрядов.

В левом столбце *таблицы 1* приведены номера разрядов, а в каждой строке столбцов 0,1,2,3,4 приведены их двоичные эквиваленты. Множества E1,E2,E3,E4,E5 образуются из совокупности номеров тех разрядов, в двоичном представлении которых в рассматриваемом столбце стоит единица.

Из полученных множеств следует, что на первом месте в каждом из них стоит контрольный разряд.

Таблица 1 Формирования множеств по Хэммингу

Номера						Множества по Хэммингу
разрядов	4	3	2	1	0	
1	0	0	0	0	1	
2	0	0	0	1	0	$E_1 = \{1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17\}$
3	0	0	0	1	1	
4	0	0	1	0	0	$E_2 = \{2, 3, 6, 7, 10, 11, 14, 15\}$
5	0	0	1	0	1	
6	0	0	1	1	0	$E_3 = \{4, 5, 6, 7, 12, 13, 14, 15\}$
7	0	0	1	1	1	
8	0	1	0	0	0	$E_4 = \{8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15\}$
9	0	1	0	0	1	
10	0	1	0	1	0	$E_5 = \{16, 17\}$
11	0	1	0	1	1	
12	0	1	1	0	0	
13	0	1	1	0	1	
14	0	1	1	1	0	
15	0	1	1	1	1	
16	1	0	0	0	0	
17	1	0	0	0	1	

В результате имеем логические функции формирования контрольных разрядов по коду Хэмминга:

$$r_1 \ = \ y_3 \oplus y_5 \oplus \ y_7 \oplus y_9 \ \oplus \ y_{11} \oplus \ y_{13} \ \oplus y_{15} \ \oplus y_{17};$$

$$r_2 = \ y_3 \oplus \ y_6 \oplus y_7 \ \oplus y_{10} \oplus y_{11} \oplus y_{14} \oplus y_{15};$$

$$r_3 = y_5 \oplus y_6 \oplus y_7 \oplus y_{12} \oplus y_{13} \oplus y_{14} \oplus y_{15};$$

$$r_4 \ = \ y_9 \oplus \ y_{10} \oplus y_{11} \oplus y_{12} \oplus y_{13} \oplus \ y_{14} \ \oplus y_{15};$$

$$r_5 = y_{17};$$

Таким образом, для кодирования информации кодом Хэмминга потребуется 25 сумматоров по mod 2, или 100 л.э.

Допустим, что, в среднем, для формирования одного контрольного разряда потребуется 5 сумматоров по mod 2, или 20 л.э.

В этом случае вероятность безотказной работы схемы контроля ОЗУ по одному выходу составит:

$$P_{X1O3V}(t) = e^{-6020 \times \lambda(t)}$$
. (13)

Так как схема контроля содержит пять контрольных разрядов, то вероятность безотказной работы схемы контроля составит:

$$P_{X.K.O3V}(t) = e^{-6020 \times \lambda(t) \times 5}$$
. (14)

Аппаратурные затраты декодирующего устройства (решающего органа) при использо-

вании кода Хэмминга составят 30 сумматора по  $mod\ 2$ , или 120 л.э.

В этом случае, вероятность безотказной работы решающего органа составит:

$$P_{X,PO}(t) = e^{-120 \times \lambda(t)}$$
. (15)

Достоверность функционирования ОЗУ, контролируемого кодом Хэмминга, определим используя выражения:

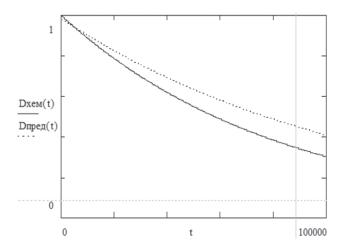
$$\begin{split} D_{\Phi,X,O3Y}(t) = & \begin{bmatrix} P_{O3Y}(t)P_{K,X,O3Y}(t) + 0,8(1 - P_{O3Y}(t)P_{K,O3Y}(t)) + 0,2\times \\ \times (1 - P_{O3Y}(t)P_{K,X,O3Y}(t)) \end{bmatrix} P_{X,PO}(t). \end{split}$$
 (16)

На рисунке 1 представлены зависимости, характеризующие достоверности функционирования ОЗУ, контролируемого соответственно кодом Хэмминга (алгебраическим линейным кодом с d=3, используемым только для обнаружения одиночных и двойных ошибок) и на основе предлагаемого методического подхода.

Анализ графических зависимостей позволяет сделать вывод о том, что использование предлагаемого методического аппарата, по отношению к коду Хэмминга обеспечивает выигрыш в достоверности функционирования контролируемого ОЗУ на большем временном участке его эксплуатации.

#### Заключение

При использовании кода Хэмминга для обнаружения одиночных и двойных ошибок в 12-разрядном двоичном слове потребуется 5 контрольных разрядов, а при использовании предлагаемого методического подхода, потребуется 3 контрольных разряда.



**Рис. 1.** Достоверности функционирования ОЗУ:  $D_{X \ni M}(t)$  – достоверность функционирования ОЗУ на основе кода Хэмминга (линейного кода с d=3);  $D_{\Pi P \not E \not A}(t)$  – достоверность функционирования ОЗУ, контролируемого на основе предлагаемого методического подхода



Аппаратурные затраты на кодирование и декодирование информации, при использовании кода Хэмминга, составят 55 сумматоров по mod 2, а при использовании предлагаемого методического подхода 41 сумматор по mod 2.

Для хранения значений контрольных разрядов в накопителе информации (M=1000 слов памяти), при использовании кода Хэмминга потребуется 5000 триггеров, а при использовании предлагаемого подхода 3000 триггеров.

Таким образом, предлагаемый методический подход позволяет обеспечить более высокую достоверность функционирования устройств хранения информации при сокращении информационной и аппаратурной избыточности.

Литература

1. Щербаков Н.С. Достоверность работы цифровых устройств. М.: Машиностроение, 1989. 224 с.

2. Hagbae Kim, Kang G. Shin Evaluation of Fault Tolerance Latency from Real-Time Application`s Perspectives // IEEE Transactions on computers, January 2000. Vol. 49. №1. P. 55-64.

3. Щербаков Н.С. Самокорректирующиеся дискретные устройства. М.: Машиностроение, 1975. 214 с.

4. R. Naseer and J. Draper. Parallel Double Error Correcting Code Design to Mitigate Multi-Bit Upsets in SRAMs // Information Sciences Institute University of Southern California, IEEE Trans Device. Mater 2008. Vol. 6. P. 222-225.

5. Prager K., Vahey M., Farwell W., Whitney J., Lieb J. A fault tolerant signal processing computer // Dependable Systems and Networks, 2000. DSN 2000. Proceedings International Conference on. 2000. P. 169-174.

6. Павлов А.А., Роберт И.В., Царьков А.Н., Павлов П.А., Сорокин Д.Е., Бурмистров А.А., Иванов Д.Д. Методический аппарат тестово-кодовой коррекции ошибок оперативных запоминающих устройств // Приборы и системы: управление, контроль, диагностика. 2016. № 1. С.23-30.

7. Павлов А.А., Павлов А.А., Царьков А.Н., Хоруженко О.В. Функционально-кодовый метод обнаружения двойных ошибок в устройствах хранения информации автоматизированных систем контроля и управления // Контроль. Диагностика, 2009. № 10. С. 60-64.

8. 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.



**УДК 629.1** 

ОЦЕНКА УБЫВАЮЩЕЙ ФУНКЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ГРУППИРОВКИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

ESTIMATING THE DECREASING FUNCTION OF THE FAILURE RATE IN THE FORMATION OF GROUPS OF COMPLEX TECHNICAL OBJECTS



заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор заместитель директора по научной работе ФГБНУ «Госметодцентр» Адрес: 115998, Москва, ул. Люсиновская, д. 51

Тел.: +7(499)706-81-24

## Валерий Викторович Пьянков

доктор технических наук, доцент старший научный сотрудник ФГБНУ «Госметодцентр» Адрес: 115998, Москва, ул. Люсиновская, д. 51 Тел.: +7(499)706-81-25

#### Аннотация

В статье рассматривается оценка интенсивностей отказов сложных технических объектов (СТО) при формировании их группировки. Приведены зависимости для оценки интенсивностей отказов при высоких и медленных темпах формирования группировки СТО. Показана эффективность применения предлагаемых зависимостей.

**Ключевые слова:** сложные системы, эксплуатация, надежность, интенсивность отказов.

The article considers the estimation of the failure rates of complex technical objects (CTO) in the formation of their group. Dependences for the evaluation of failure rates at high and slow tempo of formation of groupings of CTO are given in the article. The effectiveness of the proposed dependencies is shown.

**Keywords:** complex systems, operation, reliability, failure rate.

Процесс формирования группировки сложных технических объектов (СТО) является достаточно длительным в силу того, что, как правило, одновременный ввод в эксплуатацию всех СТО является затруднительным. При этом после ввода в эксплуатацию изменение надежности отдельного СТО характеризуется постепенным улучшением безотказности на начальном периоде в ходе приработки элементов СТО, выполнения их доработок и т.п. с последующим выравниванием (стабилизацией) показателей надежности [1].

Наиболее адекватно такая тенденция описывается уменьшающейся (в среднем) функцией интенсивности отказов [2-4]. Изменение этого показателя безотказности отдельного СТО можно аппроксимировать зависимостью вида

$$\lambda(t) = k_{\lambda}(t) \cdot \lambda_{ucx} , \qquad (1)$$

где  $\lambda_{ucx}$  – исходное значение интенсивности отказов на момент ввода СТО в эксплуатацию;  $k_{\lambda}(t)$  – масштабный коэффициент в виде убывающей функции от времени эксплуатации t.

Убывающая функция выбирается исходя из следующих соображений. Масштабный коэффициент  $k_{\lambda}(t)$  в формуле (1) должен в начальный момент времени (t=0) обеспечить исходное значение интенсивности отказов, т.е.  $k_{\lambda}(0)=1$  и  $\lambda(0)=\lambda_{ncx}$ .

С другой стороны,

$$\lim_{t\to\infty}\lambda\left(t\right)=\lambda_0$$

где  $\lambda_0$  – интенсивность отказов для периода нормальной эксплуатации после приработки и

$$\lim_{t\to\infty}k_{\lambda}\left(t\right)=k_{0}$$

т.е. с увеличением времени эксплуатации масштабный коэффициент стремится к некоторому



установившемуся значению. С учетом первого предела это значение определяется равенством  $k_0 \lambda_{ucx} = \lambda_0$  .

Следовательно

$$k_0 = \lambda_0 / \lambda_{ucx}$$

Указанным условиям удовлетворяет функция вида

$$k_{\lambda}\left(t\right) = k_0 + \left(1 - k_0\right)e^{-a_{\lambda}t}, \tag{2}$$

где  $a_{\lambda}$  – характеризует скорость снижения интенсивности отказов на начальном этапе эксплуатации.

Параметр  $a_{\lambda}$  определяется исходя из заданной (предполагаемой) продолжительности периода приработки  $T_{np}$ , по истечении которого  $\lambda(T_{np}) \approx \lambda_0$  и величина масштабного коэффициента  $k_{\lambda}(t)$  практически не отличается от  $k_0$ , т.е.

$$k_{\lambda}(t) - k_0 \le \varepsilon , \qquad (3)$$

где  $\mathcal{E}$  – установленная точность расчета.

При подстановке (2) в выражение (3) и некоторых преобразований значение параметра определяется выражением

$$a_{\lambda} \ge \ln \left( \frac{1 - k_0}{\varepsilon} \right) / T_{nn}, \tag{4}$$

а выражение (2) приводится к виду

$$k_{\lambda}(t) = k_0 + (1 - k_0)^{\frac{T_{np} - t}{T_{np}}} \varepsilon^{\frac{t}{T_{np}}},$$
 (5)

Выражения (1) и (5) описывают изменение безотказности одного СТО на рассматриваемом периоде приработки и последующей нормальной эксплуатации. Для группировки из  $N_0$  однотипных СТО полученное значение показателя должно быть увеличено в  $N_{\theta}$  раз для оценивания общей суммарной интенсивности отказов всех СТО в эксплуатации при допущении о мгновенном формировании всей группировки СТО (при t=0). Это достаточно сильное допущение. На практике оно почти всегда не выполняется из-за невысоких (замедленных) темпов ввода в эксплуатацию отдельных СТО при формировании их группировки и достаточно большой продолжительности. При этом формирование группировки представляет собой процесс постепенного наращивания количественного состава СТО через определенные, заранее известные или заданные, интервалы т. Наращивание количественного состава происходит группами по n CTO

$$1 \le n < N_0$$

В результате количество СТО в эксплуатации N(t) на рассматриваемом периоде изменяется в виде ступенчатой функции

$$N(t) = \begin{cases} n & 0 \le t < \tau; \\ s \cdot n & s \cdot \tau \le t < (s+1) \cdot \tau \quad s = \overline{1, S}; (6) \\ N_0 & t \ge T_{\Sigma}, \end{cases}$$

где

$$S = \frac{1}{n} \frac{N_0}{n} \begin{bmatrix} -\text{количество интервалов постоянства на периоде формирования группировки;} \end{bmatrix}$$

]...[ - округление до ближайшего большего целого;

 $T_{\sum} = S \cdot \tau$  – общее время формирования группировки СТО.

Величина общей интенсивности отказов  $\Lambda(t)$  при постепенном формировании группировки на каждом интервале будет определяться суммой значений функций (1), сдвинутых относительно самих себя на  $\tau$  вправо по оси времени:

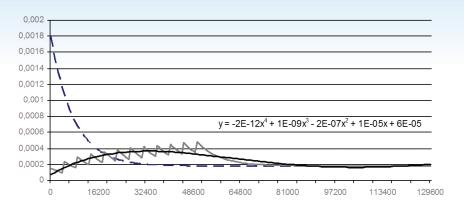
$$\Lambda(t) = \begin{cases}
n \cdot \lambda(t) & 0 \le t < \tau; \\
n \cdot \sum_{i=0}^{s} \lambda(t - i \cdot \tau) & s \cdot \tau \le t < (s+1) \cdot \tau \quad s = \overline{1, S}.
\end{cases} (7)$$

Для апробации предлагаемого подхода выбрана группировка из  $N_0$ =36 CTO, количественный состав которой формируется группами по n=3 CTO через каждые полгода ( $\tau$ =184 сут.). При исходной интенсивности отказов  $\lambda_{ucx}$ =5·10<sup>4</sup> 1/час. после приработки в течение  $T_{np}$ =4 года в период нормальной эксплуатации  $\lambda_0$ =10<sup>-5</sup> 1/час. Общее время моделирования составляет 15 лет, что соответствует гарантийному сроку эксплуатации большинства современных СТО.

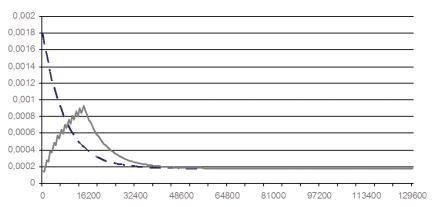
Изменение общей интенсивности отказов СТО формируемой группировки для условий рассматриваемого примера в ходе приработки и последующей нормальной эксплуатации на гарантийном периоде имеет вид, показанный на рисунке 1.

Для сравнения на рисунке 1 штриховой линией приведен график изменения интенсивности рассматриваемой группировки в предположении о мгновенном формировании количественного состава. Анализ графиков показывает, что при равном асимптотическом значении характер изменения принятого показателя безотказности на начальном периоде существенно отличается. Изменение интенсивности при постепенном формировании группировки имеет не-





**Рис. 1.** Изменение интенсивности отказов СТО при стандартном темпе формирования группировки



**Рис. 2.** Изменение интенсивности отказов СТО при высоком темпе формирования группировки

равномерный характер, но достаточно хорошо аппроксимируется полиномом четвертой степени с указанными на графике коэффициентами. При этом величина безотказности постепенно формируемой группировки на начальном периоде значительно ниже идеального значения и достигает его только к 2,5-3 году эксплуатации. Однако в последующем ее величина превышает идеальную почти на 45% и только к девятому году опускается до значения интенсивности для нормальной эксплуатации. В результате время достижения стационарного режима рассматриваемого процесса при указанном темпе формирования группировки отличается на 5-6 лет от идеализированной схемы моделирования.

При увеличении темпов ввода в эксплуатацию и, следовательно, группировки СТО картина несколько меняется. Так, при увеличении темпа ввода в эксплуатацию до  $\tau = 1$  мес. при неизменности остальных исходных данных наблюдается рост пикового значения интенсивности (рисунок 2) с последующим достаточно резким спадом. При этом отличия от идеализиро-

ванной схемы существенно сокращаются и определяются разностью достижения стационарного режима не более года.

Следовательно, при высоких темпах ввода в эксплуатацию для моделирования процесса изменения интенсивности отказов СТО в процессе формирования группировки СТО с достаточной точностью можно использовать традиционный подход без усложнения общих зависимостей для определения интенсивностей отказов СТО.

#### Литература

- 1. Емелин Н.М. Надежность ракетно-космических комплексов. М: Интерфизика, 2007. 232 с.
- 2. Байхельт Б., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход: Пер. с нем. М.: Радио и связь, 1988. 392 с.
- 3. Волков Л.И., Лукин В.Л., Сухорученков Б.И. Методы статистического контроля надежности технических систем. Юбилейный (Московская обл.): Изд-во ЗАО «ПСТМ», 2008. 332 с.
- 4. Труханов В.М. Надежность сложных технических систем типа подвижных пусковых установок на этапах производства и эксплуатации. М: Машиностроение-1, 2005. 444 с.



УДК 004.942

## МЕТОДИКА ПЕРЕХОДА ОТ IDEFO-ДИАГРАММ К ДЕТЕРМИНИРОВАННЫМ МОДЕЛЯМ СИСТЕМНОЙ ДИНАМИКИ

THE METHOD OF TRANSITION FROM IDEFO-CHART MODEL TO DETERMINISTIC MODELS OF SYSTEM DYNAMICS

### Сергей Германович Хлебников

кандидат военных наук

преподаватель Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского Адрес: 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13

Тел.: +7(931)276-70-38 E-mail: user72@mail.ru

### Александр Евгеньевич Привалов

кандидат технических наук

старший преподаватель Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского Адрес: 197198, Санкт-Петербург,

ул. Ждановская, д. 13 Тел.: +7(911)017-38-49 E-mail: cerebrum203@yandex.ru

#### Аннотация

В статье предлагается методика построения имитационной модели на основе описания исследуемой системы средствами функционального моделирования IDEFO. Для моделирования выбран метод системной динамики, который позволяет получить количественные характеристики процесса функционирования исследуемой системы, описанного IDEFO-диаграммой.

**Ключевые слова:** : IDEFO, имитационная модель, системная динамика.

#### Summary

The article presents method of constructing a simulation model based on the description of the test system by means of functional modeling IDEFO. the system dynamics method selected for modeling, which allows to obtain quantitative characteristics of the process of functioning of the system under study, described IDEFO-chart.

Keywords: IDEFO, simulation model, system dynamics.

#### Введение

Методология IDEF0 является достаточно привлекательным инструментом моделирования, обладая достаточной простотой, наглядностью и относительной дешевизной использования. Однако, несмотря на свою простоту и наглядность, функциональные диаграммы являются качественным инструментом анализа и не отражают динамики функционирования системы. Следовательно, возможности этих диаграмм существенно ограничены. Их применения недостаточно для предсказания поведения системы в ответ на управляющие воздействия и возмущающие факторы внешней среды, а также для выработки предупреждающих и корректирующих мер. Для решения данных задач необходим переход к функциональным моделям, позволяющим учитывать протекание процессов во времени, их взаимодействие между собой, распределение и использование ими ресурсов, а также вычисление характеристик функционирования системы в целом и отдельных ее элементов.

В работе [1] представлена методика перехода от описания системы с использованием методо-

логии IDEF0 к модели массового обслуживания, позволяющая строить адекватные модели систем с учетом случайных факторов, управляющих воздействий и не зависящая от структуры имитационной модели. Вместе с тем, построение и исследование моделей систем массового обслуживания требуют привлечения достаточно больших объемов статистических исходных данных (таких, как функции распределения входных потоков и времени обслуживания), которые зачастую недоступны на начальных этапах разработки системы. Кроме того, исследование стохастических моделей требует больших затрат времени и привлечения специальных методов планирования и обработки результатов экспериментов. В связи с этим, применение данного подхода представляется неоправданно сложным для решения ряда задач исследования систем. Особенно если речь идет о вновь создаваемых системах.

Альтернативой системам массового обслуживания могут выступать детерминированные модели системной динамики, которые показали свою эффективность при исследовании систем на высоком уровне абстрагирования [2].



### Сопоставление основных элементов модели в терминах системной динамики исходным понятиям нотации IDEF0

Для построения имитационной модели системы на основе ее описания с использованием методологии IDEF0 требуется, во-первых, адекватная целям моделирования интерпретация стандарта, во-вторых, набор правил, согласно которым исходным примитивам IDEF0 ставятся в соответствие основные понятия выбранного аппарата моделирования [1]. Поскольку решение первой задачи осуществляется до построения IDEF0-диаграммы, то в рамках данной статьи он не рассматривается.

Аппарат системной динамики предполагает построение имитационной модели исследуемой системы в виде потоковой диаграммы, под которой понимается представление системы в виде совокупностей потоков и накопителей. Накопитель представляет собой состояние системы – своеобразный «резервуар», «емкость», которая накапливает определенный материальный или нематериальный фактор с течением времени, а поток соответствует темпу изменения состояния системы, т.е. количеству ресурсов в единицу времени.

Накопление ресурсов в IDEF0-диаграмме осуществляется на выходах функциональных блоков, следовательно, накопители потоковой диаграммы соответствуют состояниям ресурсов на выходе функционального блока. Перемещение ресурсов между накопителями имитирует изменение их состояния, т.е. преобразование, что является целью и результатом работы любого блока IDEF0-диаграммы. Следовательно, функциональные блоки IDEF0-диаграммы определяют структуру потоков диаграммы.

Понятие «механизм» в нотации IDEF0, представляет собой средства, используемые для преобразования ресурсов. При переходе к потоковой диаграмме каждый механизм может быть описан переменной, влияющей на скорость потока, соответствующего рассматриваемой функции.

Понятие «управление» в нотации IDEF0, представляет собой условия выполнения функции, описываемой блоком моделируемой системы, которые также могут быть заданы переменными.

Дуги в нотации IDEF0, обеспечивают связь между различными функциональными блоками и могут быть перенесены из IDEF0-диаграммы в потоковую диаграмму без изменений.

При определении структуры потоков возможны два случая:

1. На входе и выходе функционального блока один и тот же ресурс (т.е. функция, описываемая блоком, состоит в изменении состояния ресур-

са). Этот случай моделируется одним потоком и двумя накопителями, соответствующими состоянию ресурса ( $pucynok\ 1$ ).



**Рис. 1.** Первый случай моделирования потоков при переходе из IDEF0-диаграммы в потоковую диаграмму

Математическая модель системы функции в данном случае представляет собой систему дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{dS_{11}}{dt} = -V_1(M_1, Y_1); \\ \frac{dS_{12}}{dt} = V_1(M_1, Y_1). \end{cases}$$

где  $S_{11}$  – объем ресурса 1 на входе функции 1;  $S_{12}$  – объем ресурса 1 на выходе функции 1;  $V_1$  – скорость преобразования состояния ресурса (скорость выполнения функции 1);

 $M_I$  – переменная, характеризующая механизм функции 1;

 $Y_I$  – переменная, характеризующая управление функции 1.

2. На входе и выходе функционального блока различные ресурсы (т.е. функция, описываемая блоком, состоит в преобразовании ресурса (нескольких ресурсов) на входе в ресурс на выходе). Этот случай моделируется двумя (несколькими) потоками и двумя (несколькими) накопителями, соответствующими состояниям ресурсов (рисунок 2).



**Рис. 2.** Второй случай моделирования потоков при переходе из IDEF0-диаграммы в потоковую диаграмму

Математическая модель системы функции в данном случае представляет собой систему дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{dS_{31}}{dt} = V_3(M_1, Y_1); \\ \frac{dS_{11}}{dt} = -V_1(V_3); \\ \frac{dS_{21}}{dt} = -V_2(V_3). \end{cases}$$



где  $S_{11}$  – объем ресурса 1 на входе функции 1;  $S_{21}$  – объем ресурса 2 на входе функции 1;

 $S_{31}$  – объем ресурса 3 на выходе функции 1;

 ${
m V}_{1}$  – скорость уничтожения ресурса 1 (скорость выполнения функции 1);

 ${
m V_2}$  – скорость уничтожения ресурса 2 (скорость выполнения функции 1);

 $V_3$  – скорость возникновения ресурса 3 (скорость выполнения функции 1);

 ${
m M}_I$  – переменная, характеризующая механизм функции 1;

 $Y_I$  – переменная, характеризующая управление функции 1.

При построении потоковой диаграммы необходимо придерживаться нескольких правил:

- потоки всегда выражаются в единицах размерности модели (человек, рублей, литров, метров, килограмм и т.п.) за единицу времени (минуту, час, день, месяц, квартал, год и т.п.);
- накопители всегда выражаются в единицах модели;
- единицы измерения потоков на входе и потоков на выходе всегда совпадают (т.е. если в модели входящий поток измеряется в единицах «человек в год», то и на выходе поток должен измеряться количеством человек за год, но никак не за месяц, квартал и т.п.).

## Этапы перехода от IDEF0-диаграмм к системно-динамическим моделям

Процесс перехода от IDEF0-диаграмм к системно-динамическим моделям можно разделить на следующие этапы:

## 1) Построение IDEF0-диаграммы исследуемого процесса.

На первом этапе строится IDEF0-диаграмма исследуемого процесса в соответствии с требованиями стандарта [3]. При этом особенно важно не допустить логико-лингвистических противоречий и неточностей, допускающих двусмысленность в интерпретации определений основных структурных элементов исходной модели. Иными словами, нужно определить, что же в действительности будет означать тот или иной термин и как будут интерпретироваться определения основных структурных элементов модели с учетом целей моделирования и аппарата системной динамики. Данное требование особенно важно для дальнейшего перехода к имитационной модели, поскольку все неточности потребуют четкого определения на последующих этапах, т.е. возврата к первому этапу.

## 2) Построение причинно-следственной диаграммы процесса.

Причинно-следственная диаграмма представляет собой эффективный инструмент для объ-

яснения структуры моделируемой системы. Она состоит из переменных и связей между ними с определенной полярностью (положительной или отрицательной). Связи между переменными изображаются стрелками. Полярность связей между переменными (положительная или отрицательная) расставляется над стрелками, при этом руководствуясь следующими правилами:

- а) положительный контур обратной связи часто определяется так, что «изменение любой переменной, стимулирует изменение другой переменной в том же направлении» (упрощенно: «чем больше тем больше», «чем меньше тем меньше»;
- б) для отрицательного контура обратной связи действует следующее определение «изменение одной переменной распространяется по кругу, пока не вернется, чтобы изменить эту переменную в направлении, противоположном начальному изменению».

Для построения причинно-следственной диаграммы, требуется выполнить следующую последовательность шагов:

- 1. Определить количество наименований ресурсов на входах и выходах функций диаграммы.
- 2. Для выделенных ресурсов определить количество возможных состояний, поместить их на диаграмме.
- 3. На основании анализа IDEF0-диаграммы определить функции, механизмы и управляющие воздействия, поместить их на диаграмме.
- 4. Определить связи между переменными, изобразить их стрелками на диаграмме.
  - 5. Определить полярность связей.

## 3) Построение потоковой диаграммы процесса.

На этапе построения потоковой диаграммы процесса осуществляется соотнесение элементов IDEF0-диаграммы с элементами потоковой диаграммы на основании диаграммы причинноследственных связей. Основными элементами потоковой диаграммы являются накопители, являющиеся аккумуляторами материальных или информационных ресурсов, и потоки, перемещающие ресурсы между накопителями.

Очевидно, что полученная модель системной динамики должна быть более сложной, чем исходная – части информации будет недоставать. К ней относятся:

- переменные, характеризующие управляющие воздействия  $(Y_1, Y_2...)$ ;
- переменные, характеризующие механизмы  $(M_1, M_2...)$ ;
- зависимости скоростей потоков от переменных модели ( $V_n(M_1,M_2,...,Y_1,Y_2,...,V_1,V_2,...,S_1,S_2,...)$ ).

Таким образом, последовательность шагов по



построению потоковой диаграммы процесса с использованием IDEF0-диаграммы, следующая:

- 1. На основе анализа ресурсов и их состояний выявить материальные и информационные потоки, расположить их в поле диаграммы.
- 2. Определить размерности ресурсов (шт., рубли, люди...), а также размерность времени протекания процесса.
- 3. Определить и расположить в поле диаграммы переменные, описывающие механизмы и управляющие воздействия, а также дополнительные переменные, определенные при построении диаграммы причинно-следственных связей.
- 4. Обозначить связи между элементами потоковой диаграммы стрелками.
- 5. Доопределить модель недостающей информацией (переменными).
- 6. Описать функционирование модели в виде системы дифференциальных уравнений.

#### 4) Реализация имитационной модели.

На последнем этапе выбирается среда для имитационного моделирования, поддерживающая модели системной динамики (AnyLogic, PowerSim) и в соответствии с математической моделью устанавливаются значения свойств элементов потоковой диаграммы исследуемого процесса.

#### Заключение

Применение системно-динамической модели, построенной на основе IDEF0-диаграммы позволит обосновать количественные характеристики моделируемой системы и избежать многих ошибок при разработке модели. Предложенная методика построения имитационной модели является достаточно универсальной и может быть использована в процессе разработки управленческих решений в качестве дополнения к IDEF0-диаграммам.

#### Литература

- 1. Тихонов С.В. Методика перехода от IDEF0 к модели в терминах теории систем массового обслуживания при исследовании бизнес-процессов организации // Управление большими системами: сборник трудов. Выпуск 21. М.: ИПУ РАН, 2008. С. 5-15.
- 2. Каталевский Д.Ю. Основы имитационного моделирования и системного анализа в управлении: Учебное пособие. М.: Издательство МГУ, 2011.
- 3. РД IDEF0–2000. Методология функционального моделирования IDEF0 М.: ИПК Издательство стандартов, 2000. 75 с.



## recovery on filesysten: dn=0 информатика, starting. Connit interval 5 hds3, internal J BLI (ПСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ winted filesysten und ordered

Inding ATS recovered Commit Interval 5

KNOUTHAID (STATE OF THE PROPERTY OF TH

УДК 681.3.06

# ПОСТРОЕНИЕ АБСТРАКТНОЙ МОДЕЛИ ЦЕЛОСТНОСТИ АДРЕСНОГО ПРОСТРАНСТВА ЯДРА ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

BUILDING AN ABSTRACT MODEL OF THE ADDRESS
SPACE INTEGRITY OF THE OPERATING SYSTEM KERNEL

### Надежда Анатольевна Чепик

старший научный сотрудник

МОУ «ИИФ»

Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а

Тел.: 8(926)533-21-15

E-mail: chepiknadya@yandex.ru

## Тимофей Ильич Комаров

аспирант НИЯУ МИФИ

Адрес: 115409, Москва, Каширское ш., д. 31

Тел.: 8(916)127-98-57 E-mail: tikomarov@mephi.ru

## Михаил Александрович Иванов

доктор технических наук, профессор

заведующий кафедрой НИЯУ МИФИ

Адрес: 115409, Москва, Каширское ш., д. 31 Тел.: 8(495)788-56-99 E-mail: maivanov@mephi.ru

#### Аннотация

Анализируется предложенный R. Leslie подход к решению задачи формальной верификации микроядра ОС, который позволяет доказывать безопасность микроядра, реализованного на любом языке программирования. Показано, что подход использует абстрактную модель обеспечения целостности адресного пространства и среды выполнения и требует доказательства соответствия формального описания модели ее спецификации. Описывается метод построения абстрактной модели обеспечения целостности адресного пространства микроядра и предлагаются новые доказательства безопасной работы ядра с памятью.

Ключевые слова: операционные системы, ядро, микроядро, формальная верификация, модель безопасности.

#### Summary

This paper presents an analysis of the approach to OS kernel formal verification proposed by R. Leslie. This approach can be used to prove security of a microkernel implemented in any programming language. We show that the approach uses an abstract model of address-space integrity and execution environment integrity and requires proof of the fact, that formal description of the model matches its specification. We describe an approach to development of an abstract model of microkernel address-space integrity and present some new proofs of microkernel memory management security.

**Keywords:** operating systems, kernel, microkernel, formal verification, security model.

Микроядро – это ядро, реализующее набор лишь самых необходимых функций операционной системы (ОС) (базовые средства межпроцессного взаимодействия, планировщик, виртуальная память) [1]. Технологические преимущества подобного подхода очевидны: ОС, построенная на микроядре, является гибкой, надежной и безопасной, поскольку её компоненты разделены и функционируют относительно независимо друг от друга.

На сегодняшний день существует единственное формально верифицированное микроядро - seL4, которое было разработано в австралийском исследовательском центре NICTA (National ICT Australia). Однако проведение работы [2] для формальной верификации реализации seL4

лишь на платформе x86 потребовало около 20 человеко-лет, что не является приемлемым.

Альтернативный подход к созданию формально верифицированного микроядра предлагается в диссертационной работе Rebekah Leslie [3]. Он заключается в модифицировании среды выполнения какоголибо языка программирования для работы без ОС, разработке специализированного НАL (слоя аппаратных абстракций) и последующей реализации поверх него ядра ОС на выбранном языке программирования. Если выбранный язык является чисто функциональным, это гарантирует отсутствие ошибок при работе с памятью и позволяет осуществить формальное доказательство свойств безопасности ядра. В работе [3] было реализовано микроядро L4 на языке Haskell,



которое оказалось в 60 раз менее производительным, чем аналогичные реализации [4]. Судя по всему, проблемы со скоростью работы обусловлены неверным выбором языка программирования (Haskell имеет громоздкую среду выполнения, программы на языке Haskell являются «ленивыми» и т.д.). Таким образом, подход, предложенный Rebekah Leslie, видится достаточно перспективным, но для его успешного использования на практике нужен язык программирования с компактной средой выполнения, который обеспечивает высокую скорость исполнения и определенную предсказуемость программ.

Одним из центральных вопросов, рассматриваемых в работе Rebekah Leslie, является изучение подходов к созданию надежного и безопасного микроядра. В частности, в работе [3] была предложена абстрактная модель аппаратного обеспечения, управляющего памятью. Данная модель служит основой подхода, предложенного в работе [5], и в конечном итоге помогает обеспечить безопасность при работе с памятью. Основными задачами, которые ставились перед этой моделью, являлось обеспечение целостности адресного пространства и среды выполнения. При этом модель включала в себя как компоненты низкого уровня, отражающие состояние аппаратуры, так и компоненты высокого уровня, отражающие состояние программного интерфейса. Доказательство соответствия формального описания модели задачам целостности было представлено лишь частично. Далее предлагаются новые доказательства безопасной работы ядра с памятью и описывается метод построения абстрактной модели.

Для решения задач обеспечения целостности среды выполнения требуется модель структуры таблиц страниц и каталогов таблиц страниц. Кроме того модель должна определять разные типы страниц памяти.

Для построения модели вводятся новые типы данных. Например, тип страницы (страница среды выполнения, обычная, таблица страниц, каталог таблиц страниц, удаленная):

```
data Page = Environment PageData
| Normal PageData
| PageDirectory DirectoryPageData
| PageTable TablePageData
```

| NotInstalled

Для проверки состояния определенных страниц используются предикаты, например:

isEnvironment, isNormal, isPageDirectory, isPageTable, isInstalled :: Page → Bool.

Любое действие в ОС не должно выводить ее из безопасного состояния, а должно переводить ее в другое безопасное состояние. Для этого в модели существует предикат для состояний wellFormed, который содержит в себе все ограничения модели:

 $\forall s \ \epsilon \ \text{State, } \forall \text{op } \epsilon \ \text{A.wellFormed } s \Rightarrow \\ \text{wellFormed step(s, op),}$ 

где A – множество действий в модели; State – множество безопасных состояний.

Модель также содержит в себе домены защиты. Каждый домен имеет доступ к ресурсам (части глобального состояния) и набору действий, которые могут в нем выполняться. Политика безопасности, входящая в модель, описывает влияние данных действий на состояние системы, путем указания доменов, которым доступны результаты действий какого-либо другого домена. Например, ядро может быть формализовано как набор доменов (набор пользовательских процессов) с политикой безопасности, которая запрещает процессам доступ к адресному пространству друг друга.

ОС может быть представлена как набор доменов, соответствующих основным ее компонентам: программному интерфейсу для доступа ядра к аппаратному обеспечению, ядру, среде выполнения и пользовательским программам. Каждый из этих компонентов имеет возможность выполнять различные действия и получать доступ к различным частям состояния системы. Рассмотрим данные домены более подробно:

```
data D = E \mid H \mid K \mid U
```

- Е. Домен окружения является абстрактным представлением системы времени выполнения языка программирования. Данный домен содержит все страницы среды выполнения и разрешает к ним произвольный доступ.
- Н. Данный домен суть набор действий, выполняемых интерфейсом Н для доступа ядра к аппаратному обеспечению. Домен не позволяет осуществлять запись на страницы среды выполнения.
- К. Домен ядра это домен ядра-клиента, использующего интерфейс Н для доступа к аппаратному обеспечению. Домен разрешает доступ на чтение, запись к страницам, отображенным в пространстве ядра.
- U. Домен пользовательского ПО. Все пользовательские программы сгруппированы, поскольку с точки зрения модели важно их влияние на состояние систему в целом, а не их взаимодействие между собой. Данный домен разрешает доступ на чтение, запись к страницам, отображенным в адресное пространство пользователя.

Каждый домен позволяет выполнять определенные действия, влияющие на состояние системы. Например, набор действий для домена К, влияющих на состояние системы, ограничивается одним действием:

WriteK va val – запись значения val на странице va, входящей в адресное пространство ядра.

Так, совокупность всех действий, разрешенных доменами, может быть описана следующим образом:



- | FreePageDirectoryH PageDirectory | AddMappingH PageDirectory [PhysicalPageAddress] PhysicalRegion VirtualRegion
- | RemoveMappingH PageDirectory VirtualRegion
- - | ExecuteH PageDirectory
  - | WriteK VirtualAddress Word8
  - | WriteU VirtualAddress Word8

Если домен A может изменять состояние домена В через некоторую часть глобального состояния, то такая связь называется интерференционной и обозначается  $\mathbb{A} \sim \mathbb{B}$ . Отсутствие интерференционной связи между двумя доменами гарантирует, что В не зависит от выполнения A. Безопасность, гарантируемая политикой, в значительной степени зависит от модели системы, потому что набор доменов, описание состояния и множество действий влияют на свойства, которые определяет политика [6].

Для создания политики безопасности необходимо определение ресурсов, операций на выделенных ресурсах и взаимодействия между доменами.

При разработке политики безопасности возможны следующие ошибки:

- Определение неправильного набора доменов. Изменение внутри домена невозможно зафиксировать, следовательно, любые системные компоненты, которые сгруппированы вместе, могут свободно взаимодействовать.
- Неправильное определение последствий действий. Для каждого действия должны быть зафиксированы все возможные последствия.
- Создание огромного количества зависимостей между доменами. Набор действий должен быть тщательно выбран, чтобы допускать только те взаимодействия между доменами, которые необходимы для решения поставленных задачи.

Построение модели начинается с описания домена окружения, в нем доступно только одно действие - WriteE, которое позволяет записывать значение на страницу среды выполнения. Таким образом, на любой домен, который позволяет осуществлять чтение данных страниц памяти, может оказывать влияние домен Е. Домены Н и К позволяют читать информацию со страниц среды выполнения, поскольку они соответствуют программным компонентам, реализованным на выбранном языке программирования, и поэтому напрямую зависят от состояния страницы среды выполнения. Сам домен окружения также следит за страницами среды выполнения. Данные ограничения приводят к выделению трех зависимостей для домена окружения:

```
E ~ E,
E ~ H,
E ~ K.
```

Далее определяются условия корректности для обеспечения безопасности, так как каждое действие в системе должно переводить систему из одного безопасного состояния в другое. Рассмотрим одно из условий корректности состояний: регистр CR3 должен указывать на таблицу страниц и каталог таблиц страниц. Данные предикаты верны, если страница, на которую указывает регистр CR3, имеет статус таблицы страниц или каталога таблиц страниц:

```
cr3IsPageDirectory :: State -> Bool
  cr3IsPageDirectory s = isPageDirectory
(status s (cr3 s))
  referenceIsPageDirectory :: State -> Bool
  referenceIsPageDirectory s =
isPageDirectory (status s (reference s))
```

Следующим шагом в обеспечении безопасности памяти является определение последствий каждого действия в рамках модели. Для описания спецификации действий выбран реляционный стиль, главным преимуществом которого является отсутствие детерминизма, что позволяет забыть про аспекты системы, не имеющие отношения к безопасности вне модели. Например, при описании поведения пользовательской программы, любые изменения, происходящие на страницах пользовательской памяти, игнорируются, что противоречит функциональной модели. Предположим, существует спецификация действия ор, которая соответствует реализации действия орІтр. Требуется показать, что для каждого ор в модели реализация орІтр:

• сохраняет безопасные состояния

```
(\forall s \in State, wellFormed s \Rightarrow wellFormed (opImp s));
```

• реализует спецификацию, когда действие возможно

```
(\forall s \ \mbox{\tt EState, wellFormed s} \ \Lambda \ (\exists s \ ', \ \mbox{\tt ActionSpec} \ op \ s \ s') \ \Rightarrow \ \mbox{\tt actionSpec} \ op \ s \ (opImp \ s));
```

• сохраняет состояние системы, когда действие невозможно

```
(\forall s \ \in \ \text{State, wellFormed s} \ \land \ (\forall s \ ', \ \neg \ (\text{actionSpec op s} \ s')) \ \Rightarrow OpImp \ s \ = \ s) \ .
```

Рассмотрим спецификацию WriteE-действия, которое имеет два аргумента: адрес памяти VirtualAddress и значение Word8. Согласно политике безопасности домен окружения влияет на себя и домен Н и должен осуществлять запись только на страницы среды выполнения. Таким образом, спецификация WriteE является корректной тогда, когда изменяется содержимое одного байта на одной странице среды.

Проверка безопасности путем дальнейшего связывания спецификаций действий с моделью является важной частью доказательства обеспечения целостности в реализации.

Структура программной системы Rushby моделирует выполнение, используя функцию:

```
step :: (S, A) \rightarrow S
```



Эта функция в результате какого-либо действия переводит систему в другое состояние. В состав функции step входят:

- набор состояний S;
- набор действий А;
- функция выполнения step ::  $S \times A \to S$ .

Реляционный стиль спецификаций усложняет реализацию функции step, поскольку позволяет одному действию инициировать переход системы в произвольное количество состояний. Для упрощения реализации введем свойство:

```
canStepTo :: State \rightarrow A \rightarrow State \rightarrow Bool, canStepTo s a s'= wellFormed s \land wellFormed s' \land actionSpec a s s'.
```

Модель должна удовлетворять условиям, которые гарантируют, что действия в системе соответствуют политике. Одной из целей политики является обеспечение целостности среды выполнения, из которой следует важное условие, что ни один другой домен не может влиять на домен окружения. Приведем несколько лемм, которые будут использоваться для проверки условий:

**Лемма 1.** Ни одно действие, принадлежащее домену U, не изменяет сопоставления виртуальной и физической памяти для любой страницы среды выполнения:

```
∀s ∈ State, pd ∈ PageDirectory,
vpa ∈ VirtualPageAddress, a∈ Action.
dom(a) = H ∧ isNormal s (translatePage
s pd vpa) ∧ ⇒
translatePage s pd vpa = translatePage
(step(s, a)) pd vpa
```

**Доказательство.** Существует единственное действие WriteU, которое не изменяет сопоставление памяти, что четко указано в его спецификации:

```
writeU :: VirtualAddress -> Word8 ->
State -> State -> Bool
  writeU va val state state'
  = writeA va val state state'
  && isUserAddress va
```

**Лемма 2.** Ни одно действие, принадлежащее домену U, не изменяет домена среды:

```
\forall s \in State, a \in Action. \ dom (a) = U \Rightarrow s \xrightarrow{E} step (s, a)
```

Доказательство. Никакое действие в домене U не изменяет отображение страницы среды выполнения согласно лемме 1. Следовательно, состояние счетчика ссылок на страницу среды выполнения не изменяется, в отличие от спецификации WriteE:

```
writeE :: VirtualAddress -> Word8 ->
State -> State -> Bool
  writeE va val state state'
  = cr3 state == cr3 state'
   && reference state == reference state'
   && regions state == regions state'
```

```
&& case translate state va of
    Nothing -> False
    Just (ppa,off) ->
    forall (\someppa
PhysicalPageAddress
     if someppa /= ppa
     then status state someppa == status
state' someppa
     else case status state someppa of
      Environment pdata ->
       case status state' someppa of
       Environment pdata' ->
        pdata' == updatePageData off val
pdata
          -> False
        -
-> False)
```

В статье показан алгоритм формирования модели обеспечения целостности адресного пространства и среды выполнения, обосновано соответствие модели ее спецификации. Для доказательства были сформулированы леммы, которые показывают, что модель удовлетворяет условиям, которые гарантируют, что действия в системе соответствуют политике безопасности. В дальнейшей работе необходимо показать, что реализация интерфейса является безопасной с точки зрения других поставленных задач. Для этого необходимо построить абстрактную модель и сформулировать доказательство выполнения всех условий, гарантирующих соответствие политике. Это позволит установить формальную связь между моделью и реализацией.

#### Литература

- 1. Liedtke J. On micro-kernel construction // In Proceedings of the Fifteenth ACM Symposium on Operating Systems Principles (SOSP 1995). 1995. P. 237-250.
- 2. Klein G. seL4: Formal Verification of an Operating-System Kernel / G. Klein, J. Andronick et al. // Proceedings of the ACM SIGOPS 22nd symposium on Operating systems principles. 2009. P. 207-220.
- 3. Leslie R. A Functional Approach to Memory-Safe Operating Systems. PhD dissertation. Portland State University, 2011.
- 4. Hallgren T.A principled approach to operating system construction in Haskell/T. Hallgren, M. P. Jones, R. Leslie, and A. Tolmach // In Olivier Danvy and Benjamin C. Pierce, editors, Proceedings of the 10th ACM SIGPLAN International Conference on Functional Programming (ICFP 2005). 2005. P. 116-128.
- 5. Rushby J. The design and verification of secure systems // In Proceedings of the Eighth ACM Symposium on Operating System Principles (SOSP 1981). 1981. P. 12-21.
- 6. Leslie R. Dynamic intransitive noninterference // In Proceedings of the First IEEE International Symposium on Secure Software Engineering, 2006.



**УДК 623** 

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ ВОЕННОЙ РОБОТОТЕХНИКИ: ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКАЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОБЛЕМЫ

## **INTELLECTUALIZATION OF MILITARY ROBOTICS: TERMINOLOGICAL AND TECHNOLOGICAL PROBLEMS**

## Игорь Александрович Бугаков Алексей Николаевич Царьков

заслуженный изобретатель РФ доктор технических наук, профессор член Научного совета по методологии искусственного интеллекта РАН Вице-президент по инновационным проектам МОУ «ИИФ»

Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а

Тел.: 8(4967)35-31-93 E-mail: bia@iifmail.ru

заслуженный деятель науки РФ доктор технических наук, профессор

Президент Института -Председатель Правления Института

моу «ииф»

Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а

Тел.: 8(4967)35-31-93 E-mail: tsarkov@iifmail.ru



#### Аннотация

Исследуются терминологическая и технологическая проблемы создания автономных мобильных интеллектуальных роботов (АМИР) и робототехнических комплексов военного назначения. Даются и обосновываются определения робота как искусственного объекта, реализующего в реальной или виртуальной среде целенаправленное рациональное поведение без непосредственного контакта с человеком, а также интеллекта как свойства способного к автономному поведению в реальной или виртуальной средах объекта с учетом генетического и индивидуального опыта достоверно предвидеть будущее и на этой основе планировать и реализовывать свое целенаправленное поведение с созданием новых стратегий и алгоритмов (программ). Обосновывается целесообразность разработки базовой универсальной технологии интеллектуализации, прообразом которой выступает природная технология интеллектуализации живых систем в процессе фило- и онтогенеза. Излагаются этапы создания АМИР и неотложные меры по ускорению процесса их разработки.

Ключевые слова: робототехника, интеллект, автономность, мобильность, интеллектуализация, технология, универсальность, целесообразность, поведение, точность, живучесть, безопасность, генетический опыт, индивидуальный опыт, предвидение, распознавание, коммуникация, виртуальная и реальная среда, междисциплинарность.

#### Summary

Terminological and technological problems of creation of autonomous mobile intellectual robots (AMIR) and robotic complexes for military purposes are investigated. The definitions of a robot as an artificial object realizing in a real or virtual environment a purposeful rational behavior without direct contact with a person and intellect as properties of an object capable of autonomous behavior in a real or virtual environment, given the genetic and individual experience, can be reliably foreseen This basis to plan and implement your goal-directed behavior with the creation of new strategies and algorithms (programs). The expediency of development of the basic universal technology of intellectualization is substantiated, the prototype of which is the natural technology of intellectualization of living systems in the process of filo- and ontogenesis. The stages of creating AMIR and urgent measures to speed up the process of their development are outlined.

Keywords: robotics, intelligence, autonomy, mobility, intellectualization, technology, universality, expediency, behavior, accuracy, survivability, security, genetic experience, individual experience, foresight, recognition, communication, virtual and real environment, interdisciplinarity.

Общими проблемами интеллектуализации робототехники различного назначения являются две проблемы – терминологическая и технологическая.

#### Терминологическая проблема

Несмотря на то, что роботизация и интеллектуализация являются сегодня двумя взаимосвязанными и взаимодополняющими магистральными направлениями развития техники, до сих

пор нет единых, раскрывающих их сущности, определений понятий «робот» и «интеллект». А без этого серьезно говорить и о роботизации, и об интеллектуализации вряд ли возможно. Речь идет не только о военной и (или) специальной робототехнике, но о роботизации и интеллектуализации роботов вообще.

Под роботом со времен К.Чапека понимают «автоматическое устройство с антропоморфным



действием», т.е. заменяющую человека при совершении тех или иных действий машину. Такое же понимание и в Военном энциклопедическом словаре [1], где под боевым роботом понимается «многофункциональное техническое устройство с антропоморфным (человекоподобным) поведением, частично или полностью выполняющее функции человека при решении определенных боевых задач». Антропоморфизм присутствует и в таком достаточно спорном определении робота военного назначения: «Робот военного назначения - разновидность робототехнического средства, выполнение задач которым осуществляется в автономном режиме за счет имитации (автоматизации) сенсорных, двигательных и (или) интеллектуальных функций человека».

Очевидно, что антропоморфизм сегодня представляется слишком узким. Современные технические устройства способны в автоматическом режиме воспроизводить различные целенаправленные действия не только человека, но и практически любого другого живого существа (змея, стрекоза, краб и др.). Более того, совмещать в себе поведенческие возможности нескольких живых организмов, а также делать то, что не делают и (или) не могут делать последние<sup>1</sup>.

Антропоморфизма нет в определениях, данных в ГОСТ Р ИСО 8373-2014 «Роботы и РТУ. Термины и определения» [2] (переводной ГОСТ серии ИСО). Однако вряд ли можно считать удовлетворительными (по нескольким причинам) приведенные там «определения» даже для все более распространяемых промышленных роботов, выполняющих однотипные операции на конвейерных производственных линиях, или о складских роботах, перемещающих грузы в складских помещениях<sup>2</sup>.

Краткое, но емкое определение дано в английском варианте Википедии: «Робот — это интеллектуальный агент (механический или виртуаль-

ный), который способен самостоятельно действовать в окружающем мире» [3]. Недостатком этого определения, на наш взгляд, является использование не менее неоднозначного, чем понятие «робот», понятия «интеллектуальный агент». Да и сама обязательность присутствия у робота интеллекта представляется избыточной. Заметим, что способность «самостоятельно действовать» не отрицает возможности действий под управлением извне (дистанционно-управляемый вариант, в том числе в виде аватара), причем само проявление этой способности, исходя из определения, не является обязательным.

Несколько сложнее ситуация с определением интеллекта, который обычно связывают с мышлением (в том числе абстрактным), пониманием, познавательными способностями, обучением, целеполаганием, планированием, адаптацией к новому, управлением внешней средой и т.д. Причем, эти качества приписывают, как правило, только человеку, пытаясь «измерять» интеллект, его различные составляющие (социальный, вербальный, творческий и пр.) с помощью тех или иных тестов<sup>3</sup>. Очевидно, что указанные составляющие в большинстве своем действительно важны и имеют отношение к интеллекту, однако сложность этого понятия не должна мешать выделить главные его свойства, определяющие возможность выполнения им своего предназначения, что крайне важно для успешности попыток искусственного воспроизводства интеллекта.

Так что есть робот и что есть интеллект? В качестве решения терминологической проблемы дадим определения, на базе которых можно будет рассматривать остальные проблемы интеллектуализации робототехники и направления их разрешения. Если говорить о роботе, то в первом приближении под роботом будем понимать способный к совершению автономных целенаправленных рациональных действий в реальной или виртуальной средах искусственный объект. Т.е. роботом может быть как реальный механизм, так и программа, действия которых в реальной или виртуальной среде напоминают действия живых организмов. На это напоминание, связь с живыми организмами указывает заложенная в определение идея рациональности поведения<sup>4</sup>, исключающая избыточно лишние, хаотичные, «неэкономные» движения (не соответствующих требованию природного принципа минималь-

чем «интеллектуальность» (агента).



<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Как, например, назвать несущую боезаряд электронномеханическую стрекозу, которая в автоматическом режиме способна находить оптические устройства подвижных боевых дистанционно-управляемых средств противника (например, танков) и путем самоподрыва выводить из строя эти устройства и, как следствие, всю дорогостоящую многотонную технику?

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Например: п.2.4. «Робот: приводной механизм, программируемый по двум и более осям, имеющий некоторую степень автономности, движущийся внутри своей рабочей среды и выполняющий задачи по предназначению», п.2.13. «Мобильный робот с автономным управлением, который может самостоятельно передвигаться», п.2.17. «Оператор – человек, осуществляющий запуск, мониторинг и остановку работ по предназначению робота или РТС», п. 2.28 «Разумный робот, робот с элементами искусственного интеллекта - выполняет работу путем считывания данных из окружающей среды, взаимодействия с внешними источниками и адаптации своего поведения».

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Не случайно самым «емким» определением интеллекта является известное ироничное замечание Э.Боринга: «Интеллект – это то, что измеряют тесты интеллекта», см., например, http://www.liveinternet.ru/users/4444754/post368338268/. <sup>4</sup> Требование «рациональности» (поведения) менее строгое,

ности [4] по минимизации при совершении действий живыми организмами при расходовании ими основных природных ресурсов – пространства, энергии, времени) для достижения цели поведения<sup>5</sup>. При этом робот может как обладать интеллектом, позволяющим ему в соответствии со складывающейся в процессе достижения цели обстановкой формировать новые, не заложенные в него при создании, эффективные алгоритмы и соответствующие им программы поведения<sup>6</sup>, так и не обладать интеллектом и действовать в строгом соответствии с заложенными в его программу жесткими предписаниями, в основном, вида «если..., то...».

Заметим, что, во-первых, автоматическое («рефлекторное») поведение по достаточно полной «жесткой» программе, учитывающей все наиболее возможные для конкретного применения варианты внешних и внутренних ситуаций, во многих случаях может быть более эффективным поведения интеллектуального (во всяком случае, быстрее реализуемым<sup>7</sup>), в котором нужные алгоритмы и программы формируются (соединяются из менее сложных частей) не заранее, а только в процессе реализации поведения. Во-вторых, сам процесс порождения на основе имеющегося опыта новых алгоритмов и на их основе программ поведения можно рассматривать как реализацию некой заранее заложенной в процессе эволюции «метапрограммы». Эта используемая и совершенствуемая в процессе жизни метапрограмма и есть то, что создает интеллект (в том числе на определенном эволюционном уровне по достижении необходимой сложности и его составную часть, основного помощника - сознание), являясь, по сути, его «техническим» воплощением. Потому интеллект часто определяют как «сверхалгоритм по порождению алгоритмов». Однако, учитывая, что в порождении под контролем сознания нового алгоритма поведения задействуются и многие неосознаваемые процессы<sup>8</sup>, реализуемые через свои программы на бессознательном уровне (результаты которых проявляются, в том числе, в виде возникающих в сознании «озарений»), то более правильнее все же говорить об интеллекте как о «метапрограмме порождения программ» [6].

Что из этого следует? Прежде всего, то, что способность создавать новое задается генетически и это позволяет не только робота, но и любое живое существо отнести к разновидности работающих по программе устройств, т.е. к автоматам<sup>9</sup>. А то, что реализация этой программы проявляется в виде некоторого заранее заданного определенного набора внутренних действий, позволяет сделать вывод о возможной воспроизводимости и этой метапрограммы, и порождаемых ею алгоритмов. В целом же – к выводу о способности машины иметь интеллект.

Интеллект как генетически заложенная метапрограмма в процессе жизни ее носителя обобщает старые и постоянно формирует новые алгоритмы поведения, доводя их в процессе разучивания и последующей тренировки (для сложных организмов под контролем сознания) до пополняющих опыт автоматизмов, жестко реализуемых алгоритмов [4, 6]. «Гибкость» интеллекта в итоге направлена на пополнение «жестких» предписаний поведения, становящихся по мере их использования все более автоматическими.

Главным в интеллекте является способность достоверно предвидеть будущее (в том числе результаты своих действий) на основе имеющегося опыта, представляющего собой сочетание генетического (видового) опыта и опыта индивидуального, получаемого в процессе жизни организма, и на основе этого предвидения - планировать свое поведение и реализовывать его как с использованием уже отработанных ранее, так и новых действий (в том числе – для более эффективного решения «старых» задач)<sup>10</sup>. Следовательно, интеллект – свойство способного к автономному поведению в реальной или виртуальной средах объекта с учетом генетического и индивидуального опыта достоверно предвидеть будущее и на этой основе планировать и реализовывать свое целе-

<sup>10</sup> Заметим, что для реализации той или иной генетически предопределенной программы нужны соответствующие условия внешней и внутренней сред. Реализацию простейшего предвидения демонстрирует любой условный рефлекс. Вспомним хрестоматийные труды и выводы гениального П.К. Анохина...



<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Заметим, что этот принцип вбирает в себя ключевые эффекты так называемой НБИК-конвергенции - интеграции, объединению возможностей нано-, био-, инфо- и когнитивных технологий, а именно - уменьшение размеров и энергопотребления. Некоторые идеи и следствия этого принципа: инерция; динамическое равновесие; диапазонность существования и развития; пороговость взаимодействия и развития; квантованность; пластичность; базисность; универсальность и инвариантность; фрактальность; полярность; сочетание иерархичности с сетевыми решениями; динамическое восприятие; приоритет крутизны; ассоциативность; подражание (имитация); предвидение; работа в приращениях; роль градиентов и производных; временная и пространственная интеграция и дифференциация и др. [4, 6].

 $<sup>^6</sup>$  Любой алгоритм как порядок действий должен для реализации быть представлен в виде исполняемого кода, т.е. программы.

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Это очевидно: за большие потенциальные возможности приходится платить меньшим быстродействием.

 $<sup>^{8}</sup>$  Хорошо известен феномен подпорогового восприятия.

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Это вывод касается и человека. «Свобода» поведения каждого из нас есть способность формировать индивидуальную траекторию жизни, но в рамках заложенного генетикой и определяющей ее проявления внешней среды.

направленное поведение с созданием новых стратегий и алгоритмов (программ) $^{11}$ .

В рамках изложенного встает вопрос о том, куда отнести дистанционно-управляемую мобильную технику, в частности, военную и специальную, причем ту ее часть, которая явно не способна к самостоятельным действиям и полностью управляется оператором? Прежде всего, заметим, что алгоритмы и программы для роботов создает человек. Вся разница между автономно действующим роботом и дистанционно-управляемой человеком техникой - только в том, что в первом случае созданный человеком алгоритм поведения робота из памяти разработчика переписывается в виде соответствующей ему программы в память робота заранее, предопределяя (детерминированно или вероятностно) его поведение в будущем, во втором же случае определяемый конечной целью алгоритм желаемого поведения техники формируется и хранится в памяти оператора, трансформируясь в программу «поведения» техники путем передачи ей (по радио- или проводному каналу) соответствующих команд в «режиме реального времени». Так что автономность поведения в обоих случаях весьма условна, причем, учитывая конечную скорость распространения радиоволн, и в первом, и во втором случае человек отделен от робота и техники и пространством, и временем. Даже возможность создания новых алгоритмов поведения ничего не меняет, ибо их создание осуществляется в соответствии с заранее заложенной программой (в математическом обеспечении робота или в голове оператора).

На основе вышеизложенного дадим другое определение робота: робот – искусственный объект, реализующий в реальной или виртуальной среде целенаправленное рациональное поведение без непосредственного контакта с человеком 12. Такое понимание позволяет нам продолжить говорить о роботах дистанционно-управляемых, полуавтономных и автономных без введения новой терминологии.

#### Технологическая проблема

Является основной и содержит две составляющие, первая из которых связана с созданием целостного, достаточно развитого для выполне-

<sup>11</sup>Сочетание природного (видового, генетического) и индивидуального опыта – уникальный природный механизм, понять целесообразность реализации которого помогает опора на один из основных природных принципов – принцип минимальности [4, 5].

ния сложных, комплексных задач искусственного интеллекта, вторая – с созданием соответствующего этому интеллекту «тела», реализующего сложные целенаправленные движения. Во многом является следствием отсутствия как необходимых фундаментальных знаний в области работы «мозга» и «тела» живых организмов, так и технических возможностей по их реализации в искусственных объектах<sup>13</sup>.

В настоящее время технология интеллектуализации применительно к создаваемым человеком объектам, способным к самостоятельному поведению, отсутствует. Во-первых, все, что называют интеллектуальным, касается выполнения, в основном, пока лишь отдельных функций, операций, связанных в большинстве своем с распознаванием (изображений, речи, текста, ...). Да, распознавание - это наиболее важная, основная функция интеллекта. Но в живом организме операцию распознавания, например изображений, осуществляет не действующая автономно зрительная система, а весь интеллект, интегрально обрабатывающий сенсорную информацию не только от органов зрения, но и всех других органов чувств с получением системного, эмерджентного эффекта. Во-вторых, реализуемый на основе идеи функциональности<sup>14</sup> процесс распознавания в технике пока не очень-то соответствует тому, как это происходит в природе, где «видит» не глаз, а мозг, причем большую часть «увиденного» он достраивает, опираясь на хранимое в памяти, на прежний опыт (в том числе - на восприятия от других органов чувств, в частности, тактильного) 15. Видение – опыт всего тела (отсюда и качество, и быстродействие).

Очевидно, что процесс интеллектуализации в природе идет непрерывно, объединяя воедино эволюционную (применительно ко всему живому), видовую (применительно к конкретному виду) и индивидуальную (применительно к жизни отдельного организма) составляющие. Надо попытаться воспользоваться опытом природы? – Да. Много ли мы знаем об этой природной технологии? – Не очень, но то, что известно, позволяет уже сейчас ставить и начинать решать задачу разработки универсальной технологии интеллектуализации (УТИ), в том числе и робототехники, причем как базовой технологии [6-12]. Природная технология формирования и интеграции (в фи-



<sup>12</sup> На основе этого определения можно формировать дальнейшие понятия, например, «робототехнический комплекс», понимая под ним, например, «совокупность робота (роботов) и обеспечивающих их функционирование технических средств (систем)».

 $<sup>^{13}</sup>$  Нано- и аддитивные технологии рассматривают как основу для технологий будущего.

 $<sup>^{14}</sup>$  Любую функцию можно реализовать различными способами, на различном субстрате.

оами, на различном суострате.

15 Потому мы и получаем технический «гдаз орда» с похожими на реального орда возможностями по видению на больших расстояниях, но весящий в сотни раз больше веса всего орда.

логенезе и онтогенезе) видового и индивидуального опыта - прообраз этой базовой универсальной технологии интеллектуализации робототехники. Важнейшие базисные идеи УТИ: мощная генетическая составляющая поведения, элементы которой раскрываются в определенной последовательности при наличии жизненной потребности в них, обучение через действия в среде функционирования (подражание, самообучение)<sup>16</sup>, пластичность и многоуровневость реагирования нейронов, динамическое восприятие, временность структур, одновременность участия элементов во многих структурах, наличие «эмоций» как фактора выбора и памяти, базисный подход к формированию целого из частного, важность шаблонов и ассоциаций, индивидуальная модель мира, ускоренный фило- и онтогенез, минимальная достаточность интеллекта для выполнения функций, соответствие «мозга» «телу», модульность, унификация и стандартизация, иерархически-сетевое управление, единый язык, пространственный интеллект и пр. [4-12]. УТИ применима к интеллектуализации и механических устройств, действующих в реальной среде, и виртуальных объектов, действующих в виртуальной среде. Причем из трех возможных путей ориентации в области искусственного интеллекта: на конечную функцию независимо от ее реализующего субстрата, на магическую самоорганизацию связей (коннекционизм: «создадим сеть из 96 млрд. нейронов вдруг заработает как настоящая»), на природный эволюционно-индивидуальный путь – последний является, на наш взгляд, в системном плане наиболее правильным. К тому же знание конечного результата и механизмов развития может многократно сократить время всех составляющих, обеспечить ускоренный ход большой (применительно к виду) и малой (применительно к индивиду) эволюции, ускорить филогенез и онтогенез.

Разновидностью технологической проблемы является «двигательная» проблема - проблема обеспечения требуемых по сложности и точности движений, скорости их реализации. Современные роботы ограничены в совершении целенаправленных движений как в пространстве (возможности), так и во времени (быстродействие). Тонкую работу, тем более быстро, современные роботы делать не могут. Двигательные возможности двухлетнего ребенка пока невозможно воспроизвести<sup>17</sup>. Причина – в большом количестве задействуемых мышц и сложности процес-

16 Пример – американский ATLAS за три года (2013–2016) научился ходить по пересеченной местности, https://nplus1.ru/news/2016/12/02/atlas-walkies.

сов в управляемых ими нейронных сетях мозга живых организмах, механизмы функционирования которых все еще во многом непонятны<sup>18</sup>. Очевидно, что уровень развития интеллекта должен соответствовать уровню развития тела и наоборот [12]<sup>19</sup>. Тенденция в перемещении: колесо, гусеница, конечности.

К числу <u>основных частных проблем</u> интеллектуализации роботов (P) и робототехнических комплексов (РТК) военного назначения отнесем:

- 1. Недостаточно ясное в настоящее время стратегическое понимание того, что, где и для чего использовать. Проблема берет начало от терминологии и во многом определяется технологией. Решается методом последовательных приближений путем сопоставления потребностей заказчиков и возможностей производителей с учетом национальных достижений и традиций, мировых тенденций.
- 2. Обеспечение высокого быстродействия реализации поведения. Во враждебной среде это наиболее важная составляющая. Готовность к «молниеносности» войн будущего, упреждающим ударам по всей территории.
- 3. Обеспечение достижения заданных показателей базисной триады показателей качества Р и РТК: «точность», «живучесть», «безопасность»  $[5]^{20}$ . Важнейшая составляющая этой проблемы - комплексная проблема распознавания, составляющие которой: «свой-чужой», «живое-неживое», распознавание действий, эмоций, намерений, ситуаций. Восхваляемые ныне нейронные сети глубокого обучения имеют два важных взаимосвязанных и исключающих их применение в ответственных случаях (а таковыми в большинстве своем и являются случаи военного и специального применения Р и РТК) недостатка: неспособность «объяснить» человеку свой выбор при принятии того или иного решения при наличии «способности» совершать грубые ошибки<sup>21</sup>.
- 4. Миниатюризацию элементной базы мобильных Р и РТК, обеспечивающую реализацию их группового поведения, «стайного», «ро-

<sup>21</sup> Известный приведенный в Интернете пример такой ошибки – распознавание разработанной по заказу Пентагона нейронной сетью не танков на фоне деревьев леса, а облачного и безоблачного дня, ибо лес без танков снимался в безоблачный день, а лес с танками – в облачный, на что и настроилась нейросеть при обучении.



 $<sup>^{17}</sup>$  У человека более 600 мышц и 300 суставов, причем каждый шаг, например, задействует около 300 мышц.

<sup>&</sup>lt;sup>18</sup> Многие выдающиеся идеи современной биомеханики сформулированы Н.Бернштейном, в частности о терминальном наведении целенаправленных движений.

<sup>19</sup> Считается, что в природе основная функция мозга связана с обеспечением и совершенствованием все более тонких и точных движений, ибо движение – единственный способ оказать влияние на среду, выжить.

 $<sup>^{20}</sup>$  Проблема дружественности ИИ существует и опасность неконтролируемого саморазвития ИИ, по нашему мнению, вполне реальна.

евого» выполнения боевых и обеспечивающих задач, позволяющего существенно повысить все показатели триады за счет распределения в пространстве-времени «организма» стаи (роя).

- 5. Наличие средств и технологий обучение Р и РТК и операторов (индивидуальное и коллективное) в виртуальной и реальной средах.
- 6. Комплексную коммуникационную проблему, связанную с обеспечением:
- эффективности радиоканала в условиях естественных помех, целенаправленного подавления радиоканала и перехвата управления;
- языкового общения роботов между собой и с оператором, командиром и, в целом, понимания роботом происходящего (социальный интеллект), способность учитывать эмоциональную составляющую;
- объединения возможностей интеллекта человека с возможностями машины (быстродействующий интерфейс мозг-компьютер).

## Этапы создания автономных мобильных интеллектуальных роботов (АМИР) и РТК:

- 1. Определение условий функционирования Р и РТК, выполняемых задач, общих тактикотехнических требований и характеристик.
- 2. Формирование облика, структуры, «скелета» (платформы), внешней и внутренней сенсорных систем, обоснование степеней свободы подвижных частей и механизмов их взаимодействия, движителей, источников энергии,..., частных технических требований к системам и узлам, их подгонка.
- 3. Разработка «генетической памяти» с базисными программами развития, отражающими «пирамиду потребностей» (во имя целевого предназначения) Р и РТК с указанием степени ограничения, программ (само) обучения, защищенной программы обеспечения желаемой «дружественности».
- 4. Запуск программы «жизни» с последовательным помещением Р и РТК в развивающие виртуальные и реальные среды для ускоренной отработки индивидуальных алгоритмов одиночного и коллективного (с себе подобными, роботами другого вида, человеком) поведения, коррекция опыта.
- 5. Сдача Р и РТК «выпускных экзаменов» на готовность к выполнению задач, подтверждение «квалификации».
- 6. «Служба» в своей воинской части с участием в штатных тренировках, учениях.
- 7. Периодические «повышение квалификации» Р и РТК посредством освоения ими дополнительных образовательных профессиональных программ.

Учитывая (на основе информации в откры-

тых СМИ) наличие определенных успехов ведущих стран блока НАТО в создании автономных роботов, росте возможностей искусственного интеллекта, необходимо принятие срочных мер по системному становлению и развитию научно-практического направления, связанного с созданием отечественных автономных мобильных интеллектуальных роботов со способностями живых организмов (от «ящерицы» с ее высоким быстродействием, основанном на генетических программах<sup>22</sup>) до человека с его абстрактным мышлением, выработкой специального эффективного языка коллективного взаимодействия.

### Требуются:

- 1. Концепция и госпрограмма, посвященные разработке автономных мобильных интеллектуальных роботов и РТК военного назначения.
- 2. Междисциплинарный творческий коллектив ученых и специалистов для ускоренной разработки универсальной базисной технологии интеллектуализации (УБТИ) робототехники, сопровождения и экспертизы частных разработок.
- 3. Специализированное сборочно-отладочное производство Р и РТК.
- 4. Система ускоренного непрерывного образования (воспитания и обучения) интеллектуальных Р и РТК (многоуровневый «инкубатор», «курсы повышения квалификации» для Р и РТК).
- 5. Система непрерывного образования (базисные образовательные программы, курсы повышения квалификации, тренажерные комплексы, виртуальные полигоны) операторов, боевого и вспомогательного состава, взаимодействующего с интеллектуальными Р и РТК в процессе подготовки и ведения боевых действий.
- 6. Виртуальные и реальные обучающие и испытательные полигоны для формирования, отработки и проверки индивидуальных и командных навыков.
- 7. Система доработки и модернизации Р и РТК, их сопровождения на всех этапах жизненного цикла.

МОУ «ИИФ» готов к сотрудничеству, междисциплинарному взаимодействию, решению вышеизложенных проблем интеллектуализации Р и РТК военного назначения как в терминологическом, так и в технологическом контексте.

#### Литература

1. Военный энциклопедический словарь. Сайт МО РФ. http://encyclopedia.mil.ru/encyclopedia/dictionary/details.htm?id=3551@morfDictionary.



 $<sup>^{22}</sup>$  Сенсорный сигнал сразу запускает нужные моторные нейроны без потери времени на обработку.

- 2. ГОСТ Р ИСО 8373-2014 «Роботы и РТУ. Термины и определения», введен в действие  $01.01.2016~\mathrm{r.}$
- 3. Роботехника ждет своего Стива Джобса, но он пока запаздывает, http://ai-news.ru/2017/05/robotehnika\_zhdet\_svoego\_stiva\_dzhobsa\_no\_on\_poka\_zapazdyvaet.html, 2017-05-24 05:38.
- 4. Бугаков И.А. Принцип минимальности и деятельность мозга // Сборник научных трудов юбилейного симпозиума, посвященного 150-летию изданию статьи И.М. Сеченова «Рефлексы головного мозга». М.: ИИнтелл, 2014. С. 291-316.
- 5. Бугаков И.А. Сознание, интеллект, нейрофилософия и принцип минимальности // Актуальные вопросы нейрофилософии 2015. Ежегодник. Материалы международного междисциплинарного семинара «Нейрофилософия». Ред. Алексеев А.Ю., Дубровский Д.И., Кузнецов В.Г. М.: ИИнтелл, 2016. С. 106-130.
- 6. Бугаков И.А. Система принципов построения сложных технических систем и их элементов, подвергающихся экстремальным воздействиям в процессе функционирования, на основе антропологического подхода // «Датчики и Системы», 2000. №10. С. 67-71.
- 7. Бугаков И.А. Царьков А.Н. Базовая универсальная технология интеллектуализации ВВСТ: концептуальные идеи // Известия Института инженерной физики, 2015. № 2(36). С.65-72.
- 8. Бугаков И.А. Бугаков А.И., Котов А.А., Умников Е.В., Царьков А.Н. Принцип минимальности и интеллектуализация робототехники: на пути к универсальной технологии // Материалы Десятой Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и зада-

- чи управления». Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета, 2015. Т.2. С.133-146.
- 9. Бугаков И.А. О необходимости разработки методологии, теории и универсальной технологии интеллектуализации робототехники военного и специального назначения // Труды военно-научной конференции «Роботизация Вооруженных сил Российской Федерации». М., 2016. С. 87-89.
- 10. Бугаков И.А., Царьков А.Н. Универсальная технология интеллектуализации робототехники: основания интеллектуального поведения // Материалы Одиннадцатой Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». Ростов-на-Дону, 2016. Т. 2. С. 303-316.
- 11. Бугаков И.А. Базисный подход как универсальный механизм реализации поведения интеллектуальных антропоморфных роботов // Сборник трудов участников VI Всероссийской научнопрактической конференции «Современное непрерывное образование и инновационное развитие» // Под редакцией А.Н. Царькова и И.А. Бугакова. Серпухов: МОУ «ИИФ», 2016. С. 135-138.
- 12. Бугаков И.А., Царьков А.Н. Искусственный интеллект в военной робототехнике: возможности, риски, пути реализации // Перспективные системы и задачи управления: материалы Двенадцатой Всероссийской научно-практической конференции и Восьмой молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах» / Южный федеральный университет. Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2017. С. 250-260.







**УДК 378.6** 

ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ СРЕДА КАК ОСНОВА ФОРМИРОВАНИЯ ЗДОРОВЬЕСБЕРЕГАЮЩЕЙ КУЛЬТУРЫ КУРСАНТОВ ВОЕННЫХ ВУЗОВ

THE EDUCATIONAL ENVIRONMENT AS A BASIS FOR THE FORMATION OF A HEALTH-SAVING CULTURE OF MILITARY CADETS

## Денис Викторович Шугалей

преподаватель начальник медицинской службы филиал ВА РВСН им. Петра Великого Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17

Тел.: +7(929)681-81-36 E-mail: denmsi@mail.ru

#### Аннотация

Статья посвящена актуальной проблеме формирования культуры здоровьесбережения курсантов. В ней анализируется образовательная среда как фундамент формирования здоровьесберегающей культуры курсантов военных вузов. Отражены компоненты здоровьесберегающей культуры, современные проблемы по формированию здоровьесберегающей культуры, которые нуждаются в решении. Приведены и проанализированы основные противоречия здоровьесберегающей культуры. Выявлена комфортная среда для курсантов. Предложены рекомендации по формированию здоровьесберегающей культуры в систему военного образования и в практику воспитательной работы курсантов.

**Ключевые слова:** здоровьесбережение, охрана здоровья, формирование качеств, направленность образа жизни, культура.

#### Summary

The article deal with the problem of cadets' health saving and forming the proper attitude to physical culture. The authors analyze which influence the developing health saving culture of cadets. The article contains the criteria of cadets' competence in the sphere of health saving, development of health saving competence and ways of sickness prevention. The article gives comparative analysis of health saving competence of conscripts and contracted cadets. The main aim of implementation of principles of health saving competence is outlined here. The authors suggest some recommendations on forming health saving competence in the process of military education.

**Keywords:** health care competence, health care, developing skills, way of life.

Здоровьесберегающая культура является системой внешних воздействий, к которым у военнослужащих вырабатываются механизмы адаптации (приспособления). Ее можно условно представить как комплекс шести показателей: учебная нагрузка, режим образовательного процесса, технология обучения, условия обучения и воспитания, двигательная активность и организация питания [4]. В последнее время постоян-

но говорят о здоровье, как о важнейшей высшей ценности человека, которое формируется под влиянием ряда социальных факторов, именуемых как здоровый образ жизни. На сегодняшний день специалисты здравоохранения считают, что здоровье человека на 50% зависит от здорового образа жизни, поэтому первостепенной задачей является сохранение и укрепление здоровья.



Здоровьесберегающая культура включает в себя следующие компоненты [3]:

- 1. Оптимизация санитарно-гигиенических условий обучения.
- 2. Обеспечение полноценного питания курсантов в образовательном учреждении.
- 3. Рациональная организация учебного процесса и режима учебной нагрузки.
- 4. Обеспечение психологического комфорта всем участникам образовательного процесса.
- 5. Совершенствование системы физического воспитания.
- 6. Использование здоровьесберегающих образовательных технологий.
- 7. Внедрение в учебно-воспитательный процесс оздоровительных мероприятий.
- 8. Широкое использование программ образования в сфере здоровья.
- 11.Обучение педагогических кадров по вопросам охраны здоровья.
  - 12. Проведение проверки здоровья.

Существует немало современных проблем по формированию здоровьесберегающей культуры, которые нуждаются в решении, а именно:

- а) необходимость уточнения содержания и структуры образовательной культуры применительно к особенностям жизнедеятельности курсантов;
- б) значимость выявления основных условий и стимулов успешного функционирования здоровьесберегающей работы с курсантами.

К настоящему времени сложились противоречия:

- а) между реально существующим и необходимым уровнем здоровьесберегающей культуры курсантов;
- б) между новыми социокультурными требованиями к осуществлению здоровьесберегающей работы в условиях военного вуза и недостаточной компетентностью в этом направлении преподавателей и командиров;
- в) между образовательными возможностями военных вузов и недостаточной научно-теоретической и практической разработанностью системы здоровьесберегающих технологий.

Личностное саморазвитие – это процесс целенаправленной деятельности личности по непрерывному самоизменению, сознательному управлению своим развитием, выбор целей, путей и средств самосовершенствования сообразно жизненным ценностям.

Личностное саморазвитие курсанта военного института – это детерминируемый (то есть предопределяемый) условиями обучения в военном вузе и характером будущей службы процесс духовно-нравственного самостроительства, сознательно управляемый личностью и направленный на активную деятельность по развитию у себя личностно значимых качеств, установлению своих собственных духовных начал.

Активизация личностного саморазвития курсанта в образовательном процессе военного института должна рассматриваться как побуждение его к активности, как процесс целенаправленных усилий со стороны педагогов по актуализации его внутренних потенциалов. Активизация процесса личностного саморазвития протекает на основе создания педагогических условий, вследствие которых курсант способен самостоятельно и ответственно выстраивать цели, задачи, планы личностного саморазвития.

Одним из условий активизации личностного саморазвития курсанта в образовательном процессе военного института является включение курсанта в творческую самодеятельность, рождающую мотивацию и опыт личностного саморазвития.

Эти противоречия, имеющие тенденцию к нарастанию, отражают объективно существующую проблему, ее социальную значимость, практическую востребованность, а также ее недостаточную разработанность. На основе изложенного, одной из приоритетных задач, стоящих перед военными вузами в течение последних лет, является сохранение и укрепление здоровья будущих офицеров. И мотивация курсантов к здоровому образу жизни, к культивированию в себе общей здоровьесберегающей культуры играет здесь очень большую роль. Наиболее актуально и остро указанные проблемы стоят перед будущими офицерами. В современных условиях требуется такое развитие личности курсанта в процессе образования, которое обеспечит ему возможность в дальнейшем опережать существующую в каждый момент времени востребованность знаний за счет собственной познавательной активности.

Основой формирования здоровьесберегающей культуры курсантов военного вуза является формирование образовательной среды их обучения.

Структурная схема формирования образовательной среды в военном вузе представлена на рисунке 1.

Образовательная среда военного вуза прямо или косвенно влияет на организм курсантов и формирует его адаптационные возможности и состояние здоровья. В тех случаях, когда образовательная среда оказывается оптимальной и сила воздействия соответствует адаптационным возможностям, происходит благоприятный процесс обучения и развития курсантов. При





Рис. 1. Модель процесса формирования образовательной среды в военном вузе

этом способность курсантов приспосабливаться к постоянно меняющимся условиям образовательной среды становится фактором укрепления его здоровья. В тех же случаях, когда образовательная среда не соответствует адаптационным возможностям организма, возникает перенапряжение механизмов адаптации и формируются предпатологические и патологические состояния. Комфортная среда для курсантов – это возможность проявления:

- активности в учебном и образовательном процессе;
  - высокого уровня мотивации;
- комфортных условий, которые создаются в коллективе сверстников;
- удовлетворенностью образовательным процессом;
- реализации своих индивидуальных возможностей.

Заключение. Ответственность за психологический климат несут командиры и педагоги. Педагоги отвечают за организацию учебно-воспитательного процесса во время обучения. А роль

командиров заключается в создании благоприятной микросоциальной среды вне учебного времени. Грамотно организованная образовательная среда военного образовательного учреждения позволяет своевременно внести поправки и оперативно влиять на качество военного образования.

### Литература

- 1. Амосов Н.М. Раздумья о здоровье. 3-е изд., доп. и перераб. М.: Физкультура и спорт, 1987. 63 с.
- 2. Анисимов О.С. Методологическая культура педагогической деятельности и мышления. М.: Экономика, 1991.
- 3. Безруких М.М. Здоровьесберегающая школа. М.: Московский психолого-социальный институт, 2004. 240 с.
- 4. Колесов Д.В. Болезни поведения: Воспитание здорового образа жизни. М.: Дрофа, 2002. 192 с.
- 5. Смирнов Н.К. Здоровьесберегающие образовательные технологии в работе учителя школы. М.: АРКТИ, 2003. 272 с.
- 6. Симонятова Т.П. Здоровье: Психологическое сопровождение образовательной программы «Здоровье» / Т.П. Симонятова, И.А. Паршутин. М.: РОО «Образование и здоровье», 2003. 128 с.



УДК 378.126

ПСИХОЛОГО-ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ УПРАВЛЕНЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРОФЕССОРСКО-ПРЕПОДАВАТЕЛЬСКОГО СОСТАВА НА КАФЕДРЕ ВУЗА

THE RATIONALE FOR THE CONTENT
MANAGEMENT OF THE OFFICIAL FUNCTION
OF THE FACULTY IN THE DEPARTAMENT

## Игорь Анатольевич Обыночный

преподаватель

филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)

Адрес: 142202, Московская обл., г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17

Тел.: +7(4967)78-97-32

E-mail: igorobynochnyy@mail.ru



В статье раскрыто содержание управленческого должностного функционала профессорско-преподавательского состава. Проведен анализ универсальных функций управленческой деятельности профессорско-преподавательского состава с учетом психологических аспектов их сущности.

**Ключевые слова:** управленческие компетенции, управленческая деятельность, профессорско-преподавательский состав.

#### Summary

The article discloses the content of the managerial functionary of the faculty. The analysis of universal functions of administrative activity of the teaching staff taking into account the psychological aspects of their essence is carried out.

Keywords: managerial competence, management activity, faculty.

Управленческая деятельность по своему содержанию является одной из самых сложных из множества видов профессиональной деятельности.

В настоящее время преподаватель в своей практической деятельности становится не просто «предметником», а организатором, менеджером образовательного процесса. Педагогический менеджмент можно трактовать как комплекс принципов, методов, организационных форм и технологических приемов управления образовательным процессом, направленный на повышение его эффективности [4].

При разработке профессионального стандарта преподавателя ("Педагог профессионального обучения, профессионального образования и дополнительного профессионального образо-

вания") его авторы взяли за основу профессиональную деятельность преподавателя. В качестве отправной точки использовался перечень должностей управленческих и педагогических работников образования, эти материалы были дополнены анализом профессиональной деятельности преподавателя [1].

Вид профессиональной деятельности преподавателя не ограничивается только учебной деятельностью, о чем свидетельствуют трудовые функции профессора, доцента, старшего преподавателя, преподавателя.

В настоящее время достаточно полно разработана функциональная модель управления содержанием образовательной деятельности на кафедре «Военной акмеологии и кибернетики» в Военной академии РВСН имени Петра Вели-



кого в рамках НИР «Функционал-12 и 14» [3]. Анализ функциональной модели позволяет выделить контуры управления разработкой образовательных программ, методической работой и совершенствованием учебно-лабораторной базы, научной работой, повышением квалификации и подготовкой научно-педагогических кадров, в которых все категории ППС выступают в качестве исполнителей. Вместе с тем, в контурах повышения квалификации персонала и воспроизводства научно-педагогических кадров, методической работы, совершенствования учебнолабораторной базы и технических средств обучения, управления научной работой, различные категории ППС принимают участие не только как исполнители, но и в планировании, и в контроле и корректировке деятельности.

Иерархия должностных лиц ППС обуславливается количеством трудовых функций управленческого характера (управление учебной, учебно-методической, научной работой, подготовкой НПК).

Каждая управленческая функция (вид деятельности) структурируется на управленческие этапы:

- уяснение задачи вида деятельности и планирование,
  - организация работ по выполнению плана,
  - мониторинг деятельности,
- анализ информации о состоянии выполнении плана и выработка корректирующих организационно-методических указаний,
- подведение итогов выполнения обобщенной трудовой функции и постановка задач на очередной плановый период. [2]

Управленческие функции на каждом управленческом этапе для каждого вида деятельности уточняют лишь квалификационные требования, но ничего не говорят о том как можно эффективно эти функции осуществлять, ведь любое управление это прежде всего, отношения между людьми и эти отношения реализуются намного тяжелее, когда руководитель какой-либо работы назначается из среды исполнителей и также выполняет какую-то исполнительскую функцию. Поэтому очень важно рассмотреть психологопедагогическую сущность всех аспектов управленческой деятельности.

Если проанализировать универсальные функции управленческой деятельности независимо от занимаемой должности с учетом психологических аспектов сущности каждой из них, то можно обозначить следующие компоненты управленческой деятельности: диагностический, прогностический, организаторский, коммуникативный, сравнительно-оценочный,

эмоционально-волевой, гностический [5]. Для каждого аспекта управленческой деятельности уточняются управленческие компетенции фундаментального характера, дающие представление о том, какими психолого-педагогическими знаниями и умениями должен обладать должностное лицо ППС, осуществляющее руководство какой-либо деятельностью и определяются дидактические единицы сопутствующих уровней обученности. В настоящей статье представлены дидактические единицы только для диагностического компонента аспекта управленческой деятельности.

- 1. Диагностический (психодиагностический) компонент (изучение и анализ исходного состояния (уровня) психологических и психолого-педагогических качеств объекта и субъекта управления)
- 1.1. Способность диагностировать интеллектуальные качества обучающегося (курсанта, слушателя, соискателя ученой степени), преподавателя как коллегу по ПМК, по выполнению НИР, по подготовке НПК)

**знания:** понятие интеллекта, качества человеческого интеллекта (любопытство, глубина ума, гибкость и подвижность ума, доказательность мышления, логичность мышления, критичность мышления, широта мышления),

Социальный интеллект, интеллектуальные способности (методические способности, способности исследователя), способы оценки интеллектуальных качеств

умения: оценка интеллектуальных качеств

1.2. Способность диагностировать эмоционально-волевую сферу обучающегося (курсанта, слушателя, соискателя ученой степени), преподавателя как коллегу по ПМК, по выполнению НИР, по подготовке НПК)

Дидактические единицы сопутствующих уровней обученности

**знания**: понятие эмоционально-волевой сферы человека

Волевые действия (простые сложные)

Элементы волевых действий: импульс, мотив, способ и средство деятельности, принятие решений

Нарушения эмоционально-волевой сферы личности (неуверенность в себе, неадекватная самооценка, увеличенная тревожность, проблемы во взаимодействии с другими людьми, эмоциональное напряжение, нежелание что-либо делать, увеличенная импульсивность) и их причины (перенесенные стрессы, отставание в интеллектуальном развитии, недостаточная эмоциональность контактов с близкими людьми, социально-бытовые причины)



Эмоции и чувства

Воля и ее функции

Свойства личности, в которых проявляется воля (целеустремленность, самостоятельность, решительность, настойчивость, выдержка, самообладание, мужество и смелость)

#### умения: оценка

1.3. Способность диагностировать тип темперамента обучающегося (курсанта, слушателя, соискателя ученой степени), преподавателя как коллегу по ПМК, по выполнению НИР, по подготовке НПК)

Дидактические единицы сопутствующих уровней обученности

**знания**: типы темперамента (описание и основные черты), методы диагностики темперамента

#### умения: оценка

1.4. Способность диагностировать социометрический статус обучающегося (курсанта, слушателя, соискателя ученой степени), преподавателя как коллегу по ПМК, по выполнению НИР, по подготовке НПК)

Дидактические единицы сопутствующих уровней обученности

знания: понятие социометрического статуса

- 2. Прогностический компонент управленческой деятельности (прогнозирование тенденций развития объектов и субъектов руководства на перспективу, предвидение возможных тенденций этого развития с учетом социально-экономических условий развития страны в целом, и региональных особенностей, условий, традиций в частности)
- 2.1. Способность осуществлять переход от общих ориентиров прогноза тенденций развития объектов и субъектов руководства на перспективу с учетом социально-экономических условий развития страны в целом к конкретным формам и направлениям своих видов деятельности.
- 2.2. Способность осуществлять переход от общих ориентиров прогноза тенденций развития объектов и субъектов руководства на перспективу с учетом региональных особенностей, условий, традиций к конкретным формам и направлениям своих видов деятельности.

#### 3. Организаторский компонент управленческой деятельности

- 3.1. Способность доводить до людей (подчиненных, обучающихся, коллег) суть предлагаемых им заданий, поручений с учетом психологических особенностей исполнителей при распределении обязанностей.
- 3.2. Способность доводить до людей (подчиненных, обучающихся, коллег) пути достижения целей.

3.3. Способность определять критерии результативности.

## 4. Коммуникативный компонент управленческой деятельности

4.1. Способность устанавливать позитивные отношения на разных уровнях в осуществлении делового общения в соответствии с целью и смыслом деятельности.

## 5. Мотивационный компонент управленческой деятельности

- 5.1. Способность формировать позитивного отношения каждого работника к цели и смыслу выполняемых работ с учетом иерархии мотивов каждой личности, индивидуальных особенностей людей, типологических черт всех, кто участвует в осуществлении данной деятельности.
- 5.1. Способность формировать позитивного отношения каждого работника к избранным способам действия с учетом иерархии мотивов каждой личности, индивидуальных особенностей людей, типологических черт всех, кто участвует в осуществлении данной деятельности.

#### 6. Эмоционально-волевой компонент управленческой деятельности

6.1. Способность формировать у подчиненных и поддерживать такой эмоциональный настрой, который содействует оптимальному отношению людей к порученной им деятельности, их уверенности в успешном достижении цели, помогает преодолевать трудности.

### 7. Сравнительно-оценочный компонент управленческой деятельности

- 7.1. Способность анализировать, сравнивать, оценивать работу подчиненных с точки зрения обозначенной цели деятельности и сопоставления результатов.
- 7.2. Способность анализировать и оценивать свою деятельность как руководителя на предмет степени достижения цели деятельности, позитивных моментов и трудностей, ошибок и их причин.

#### 8. Гностический компонент управленческой деятельности

- 8.1. Способность осуществлять самостоятельную познавательную деятельность (учиться на протяжении всей жизни, постоянно повышать квалификацию)
- 8.2. Способность осознавать собственные эмоции и эмоции окружающих и эффективно управлять ими.

В настоящее время завершается обоснование дидактических единиц для формирования уровней обученности в отношении остальных уточненных компетенций.

Полученные результаты позволят разработать образовательную программу для форми-



# 03(45)2017

## ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

рования уточненных управленческих компетенций психолого-педагогического характера. Для этого достаточно напротив каждого уровня обученности проставить экспертную оценку трудоемкости его освоения и указать, в какой учебной дисциплине будет дан этот уровень обученности.

## Литература

1. Приказ Минтруда Российской Федерации от 8 сентября 2015 г. №608н. Об утверждении профессионального стандарта «Педагог профессионального обучения, профессионального образования и дополнительного профессионального образования».

- 2. Утробин Г.Ф. Организационный практикум. Учеб. пособие. М.: ВА РВСН имени Петра Великого, 2014. 232 с.
- 3. Утробин Г.Ф., Обыночный И.А. Автоматизированная система диагностики качества реализации образовательных программ на кафедре // Известия Института инженерной физики, 2017. №1(43). С. 34-37.
- 4. Шевченко Г.И. Индивидуальная управленческая деятельность преподавателя как объект исследования // НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ, 2006. №46 С. 193-198.
- 5. Берлим Л.И. Управленческая компетентность менеджера образования // Известия Российского государственного университета им. А.И. Герцена, 2007. Вып. 53. Т. 22. С. 276-281.







**Sayat T. Battalov.** Adjunct. Academy of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of Russia. Moscow Region, Khimki, Novogorsk, Sokolovskaya st., 1.

**Anton I. Bocharov.** Junior scientist. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Igor A. Bugakov.** Dr.Sci.Tech., professor. Honoured devisor of Russia. Vice-President of Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Artem G. Bukin.** Candidate of technical Sciences, docent, leading researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Nadezhda A. Chepik. Senior Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Gennadiy A. Gordeev.** Head of Division of Systems and Means of Protection, Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Elena A. Dovgopolaya.** Engineer. OJSC "Corporation «Comet». Moscow, Velozavodskaya st., 5.

**Yuri V. Drobyshevsky.** PhD in Chemistry, Deputy Director for Science Limited Liability Company «Protius». Moscow, Zelenograd, Shokin Square, 2, building 4.

**Victor M. Dunilin.** Senior scientist. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Nikolay M. Emelin.** Honoured scientist of RSFSR, Dr.Sci.Tech., professor. Federal State Scientific Institution «Gosmetodcentr». Moscow, Lusinovskaya st., 51.

**Mikhail A. Ivanov.** Doctor of Engineering Sciences, prof. Head of the Department of «Computer Systems and Technologies», National Research Nuclear University MEPhI. Moscow, Kashirskoe h., 31.

**Sergey G. Khlebnikov.** Candidate of Military Sciences, lecturer. Military space academy in the name of A.F. Mozhaysky. St.-Petersburg, Zhdanovskaya st., 13.

**Eugeniy V. Kolombet.** Junior scientist. Head of the laboratory. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

**Valeriy A. Kolombet.** Candidate of Physical and Mathematical Sciences. Head of the laboratory. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

**Timofey I. Komarov.** Postgraduate Student, National Research Nuclear University MEPhI. Moscow, Kashirskoe h., 31.

**Denis A. Korsunskiy.** Scientist. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Vadim N. Lesnykh.** Junior scientist. Head of the laboratory. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

**Konstantin I. Mesha.** Professor of Department, candidate of technical Sciences. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Konstantin A. Moiseyev.** Candidate of technical Sciences, associate Professor. Professor of chair «Materials science and repair of weapons». Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Alexander A. Moskvin.** Supervisor, OJSC "Corporation «Comet». Moscow, Velozavodskaya st., 5.

**Igor A. Obynochny.** Chief officer courses. The Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.





**Alina S. Ponomariova.** Candidate of physical and mathematical sciences, senior scientist. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Vasiliy V. Popov.** Head of Department of Special Technologies and Means of Protection. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Alexander E. Privalov.** Candidate of technical sciences, senior lecturer. Military space academy in the name of A.F. Mozhaysky. St.-Petersburg, Zhdanovskaya st., 13.

**Sergey E. Potapov.** Cand.Tech.Sci, doctoral student. The Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Valery V. P'yankov.** Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher. Federal State Scientific Institution «Gosmetodcentr». Moscow, Lusinovskaya st., 51.

**Ilyas V. Rejepov.** Adjunct. The Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Denis V. Shygalei.** Teacher. Chief medical officer. The Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Nikolay V. Smirnov.** Scientific associate. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Sergei N. Stolbov.** General manager. Limited Liability Company «Protius». Moscow, Zelenograd, Shokin Square, 2, building 4.

**Dmitry A. Tokarev.** Head of Department. UPMI and JV. Ministry of Defense of the Russian Federation. Moscow, Moskvoretskaya Naberezhnaya, 9a.

**Vladimir A. Tsimbal.** The honoured worker of a science of the Russian Federation, Dr.Sci.Tech., the professor. The leading scientific employee. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Alexey N. Tzar'kov.** Honoured scientist of Russia, Dr.Sci.Tech., professor. President of Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Alexander M. Val'vakov.** Honorary worker of science and technology of Russia. Doctor of Technical Sciences, professor. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Gennadiy G. Volkov.** Doctor of physical and mathematical sciences, professor. The Petersburg Nuclear Physics Institute. Leningrad Oblast, Gatchina, Orlova roshcha, 1.



## СОБЫТИЯ СОБЫТИЯ СОБЫТИЯ СОБЫТИЯ

## ИННОВАЦИОННЫЕ РАЗРАБОТКИ МОУ «ИИФ»

В Конгрессно-выставочном центре «Патриот» министр обороны С.К. Шойгу провел выездное заседание коллегии Министерства обороны РФ, перед началом которого осмотрел выставку передовых достижений предприятий оборонно-промышленного комплекса.

Начальник отдела информационных проектов МОУ «ИИФ» А.В. Шестаков провел для министра обороны и его заместителей презентацию автоматизированной информационно-аналитической системы «Портал оборонных технологий». Запуск портала в тестовом режиме планируется к началу работы Международного военно-технического форума «Армия-2017». Эта передовая разработка ученых МОУ «ИИФ» и АО «ИКИП» призвана повысить эффективность реализации инновационной деятельности и станет базой для реализации следующего этапа – создания единого информационного пространства по инновационным технологиям ВС РФ, что позволит обеспечить руководителей Минобороны актуальной информацией в режиме реального времени.



На выставке были представлены научные разработки, выполненные Институтом инженерной физики в интересах РВСН и ВС России в целом. Первый заместитель генерального директора по научной работе МОУ «ИИФ» – главный конструктор С.В. Смуров доложил министру обороны и командующему РВСН о разработках Института в области навигации и связи. Были продемонстрированы приборы и макеты баз эталонирования средств топогеодезического обеспечения, предназначенные для проверки средств измерений геодезических приборов с очень высокой точностью.

#### ДОЛОЖИЛИ МИНИСТРУ ОБОРОНЫ

В рамках тематической выставки, организованной перед заседанием коллегии Министерства обороны РФ, МОУ «ИИФ» совместно с руководством ВМФ представили костюм водолаза, а также эвакуационный термомешок, оснащенные системой локального обогрева.

Разработанная учеными МОУ «ИИФ» технология обеспечивает создание комфортных условий работы военных в экстремальных условиях низких температур, а также водолазов на различных



глубинах при температуре воды от -2 до +15°С, и позволяет увеличить на 30-40% время пребывания водолаза под водой без переохлаждения организма. Эвакуационный термомешок выполнен из плотной водонепроницаемой ткани, прошитой лавсановыми нитями, которые нагревают поверхность мешка до нужной температуры, что обеспечивает комфортные условия при транспортировании в нем пострадавшего.

## НАЧАЛИ СТРОИТЕЛЬСТВО С БОЖИЕЙ ПОМОЩЬЮ

Состоялась закладка символического первого камня и освящение нового производственного комплекса МОУ «ИИФ» для серийного и опытного производства ряда инновационных разработок Института для нужд оборонно-промышленного комплекса и народного хозяйства. В частности, изготовление экипировки с системой электрообогрева для военнослужащих и водолазов, производство и механическая обработка деталей и сложных технических и электронных систем для военных и гражданских нужд. Комплекс представляет собой технологический центр кластерного типа, на котором создадут около 350 новых рабочих мест. Выпуск продукции будет осуществляться в соответствии со всеми экологическими нормами.







Для публикации принимаются статьи на русском языке. Рекомендуемый объем статьи – 0,2–0,4 п.л. (8000–16000 знаков).

Тексты должны быть представлены:

О в электронном виде (Word 2003). Иллюстративный материал (сложные формулы, рисунки, фотографии и т.д.) кроме размещения в тексте обязательно должны предоставляться отдельными файлами!

O на бумажном носителе формата A4.

**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.

нее и левое – 2,5 см, правое и нижнее – 2 см. Вверху первой страницы статьи размещаются:

О рубрика журнала (см. Приложение 1);

О УДК;

О название статьи <u>с переводом на английский язык;</u>

О имя, отчество, фамилия автора (авторов), ученая степень, ученое звание, должность и место работы.

**Список литературы** (**Литература**) размещается в конце статьи.

После литературы помещаются:

О список ключевых слов, краткая аннотация (на русском и английском языках).

Завершает рукопись полная информация об авторе (авторах):

**О** ФИО;

О ученая степень, ученое звание, должность и место работы <u>с переводом на английский язык;</u>

О адрес места работы, контактные телефоны, электронный адрес (по желанию автора – домашний адрес и телефон).

#### Обращаем особое внимание на:

О точность и правильность библиографического оформления списка литературы (в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008);

О выверенность статьи в компьютерном наборе;

О полное соответствие файла на электронном носителе (диске, дискете) и бумажного варианта.

Редакционная коллегия оставляет за собой право на редактирование статей, при этом с точки зрения научного содержания авторский вариант сохраняется.

Статьи, не принятые к публикации, не возвращаются.

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается!

#### Приложение 1

## РУБРИКАЦИЯ ЖУРНАЛА «Известия Института инженерной физики»

### Постоянные рубрики

- Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы.
- Радиотехника и связь.
- Информатика, вычислительная техника и управление.

#### Разовые рубрики

- Техника специального назначения.
- Инновационные проекты.
- Техническое регулирование.
- Профессиональное образование.
- Искусственный интеллект и робототехника.
- Медицина и фармацевтика.
- Диагностические системы.
- Научные обзоры. Научные рецензии.
   Отзывы.

В соответствии с Решением Межведомственной комиссии РФ по защите государственной тайны №69 от 26 февраля 2001 г., требованиями законов №5485-1 «О государственной тайне» от 21 июля 1993 г., №149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и защите информации» от 27 июля 2006 г. статьи для публикации принимаются только при наличии экспертного заключения с разрешением на открытое опубликование.





## INTERREGIONAL PUBLIC INSTITUTION "INSTITUTE OF ENGINEERING PHYSICS"

(SCIENTIFIC, EDUCATIONAL AND INDUSTRIAL INSTITUTION)

## **CONTENTS**

INSTRUMENT MAKING, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES AND SYSTEMS	Tsimbal V.A., Moskvin A.A., Dovgopolaya E.A. Finding the probabilistic-temporal characteristics of message delivery in data networks with «point-to-multipoint»
Moiseyev K.A. Physical signs of resonance of the mechanical systems with linear and nonlinear resilient connections	connections with different quality of communication channels60
Moiseyev K.A. Evaluation of the effect of axisymmetric	INFORMATION SCIENCE, COMPUTING AND MANAGEMENT
and non axisymmetric loads on the dynamic behavior of a circular cylindrical shell supported on irregular a set of ring frames12	Korsunskiy D.A. Methodical approach improve the reliability of operation storage and transmission of information with a minimum of information and instrumental redundanc
Drobyshevsky Y.V., Dunilin V.M., Volkov G.G., Stolbov S.N. Reactor neutrinoes, structure of a neutron and ge-	
ometry of space time17	
Gordeev G.A., Popov V.V., Bukin A.G., Ponomariova	complex technical objects
<b>A.S.</b> Computational modeling of the effect of broadband random vibration on the electronic device module during instrument control tests29	Khlebnikov S.G., Privalov A.E. The method of transition from IDEFO-chart model to deterministic models of system dynamics
Bukin A.G., Smirnov N.V., Ponomariova A.S., Gordeev	Chepik N.A., Komarov T.I., Ivanov M.A. Building an ab-
<b>G.A., Popov V.V.</b> Computational modeling of the heat dissipation of the electronic device module during testing of equipment	stract model of the address space integrity of the operating system kernel83
RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATIONS	ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND ROBOTICS
Kolombet V.A., Lesnykh V.N., Kolombet E.V. Accounting the Puetz's network existence is a new way to improving efficiency of target recognition	Bugakov I.A., Tzar'kov A.N. Intellectualization of military robotics: terminological and technological problems
Battalov S.T. Methodology of the rational building of	PROFESSIONAL EDUCATION
the organizational-technical structure of the alert management system40	<b>Shygalei D.V.</b> The educational environment as a basis for the formation of a health-saving culture of military
<b>Potapov S.E.</b> The method of optimal control of topology and traffic in a multiservice digital radio network47	cadets94
Bocharov A.I., Mesha K.I. The calculation results of	<b>Obynochny I.A.</b> The rationale for the content management of the official function of the faculty in the Depar-
power of the useful signal and noise at the input of the	tament97
receiving antenna of the radar under various climatic conditions in a wooded area at different values of wave-	Authors
lengths52	<b>Events</b>
Mesha K.I., Bocharov A.I. Analysis of ways to improve the effectiveness of ASO objects of the Strategic Missile Forces54	Requirements to authors104
Rejepov I.V., Tokarev D.A., Val'vakov A.M. Mathemati-	
cal modeling of the procedure of automatic connection (ALE) «point-to-point» in the system of decametric ra-	
dio communication on the basis of the protocol MIL-	
STD-188-1/1R 56	



Межрегиональное общественное учреждение

«Институт инженерной физики»

(МОУ «ИИФ»)

научное, образовательное и производственное учреждение