№ 1 [63]
2022
+0

научно-технический журнал

Известия

ИНСТИТУТА ИНЖЕНЕРНОЙ ФИЗИКИ

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

В НОМЕРЕ

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

2 **Миняев С.И., Черепенькина К.О.**
Глобальный численный поиск «жестких» и «горячих» точек атмосферы Земли

6 **Алаторцев А.И., Фуров А.Н., Нищаков И.С.**
Оценка возможностей перехвата тел природного происхождения в плотных слоях атмосферы

9 **Смуров С.В., Салько А.Е., Загарских В.И., Кузин Е.Н.**
Графоаналитическая оценка критических условий возбуждения детонации в заряде ВМ, заключенном в оболочку, при разрезании последней с помощью УКЗ

14 **Беркович С.Б., Котов Н.И., Шолохов А.В.**
Синтез имитационных моделей трансформант аномального гравитационного поля Земли с учётом условия его потенциальности

20 **Коломбет В.А., Панчелюга В.А., Лесных В.Н.**
«Бифуркация кватерниона» как путь к математическому описанию расщепления материи на массивные частицы и безмассовые поля

23 **Усик Б.А., Лучин А.В., Обыночный И.А.**
Повышение эффективности параллельной работы дизель-генераторов в условиях переменной нагрузки

27 **Захаров В.Л., Смирнов Д.В., Казаков Р.Р., Альдебергенов Т.Н.**
Программный комплекс по определению параметров звезд оптико-электронными приборами космических аппаратов

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

31 **Зеленевский В.В., Зеленевский Ю.В., Попов А.В., Егоров В.В., Наконечный А.Б.**
Оценка энергетических и статистических характеристик радиоканалов метрового диапазона при низко поднятых антеннах

36 **Синюк А.Д., Тарасов А.А.**
Информационные базисы открытого сетевого многоключевого согласования

43 **Квашенников В.В.**
Построение системы ортогональных проверок для исправления стираний за пределами минимального кодового расстояния

48 **Москвин А.А., Данилов В.П.**
Особенности моделирования информационного обмена в базовом сегменте иерархической сети при различном качестве каналов передачи данных

54 **Цимбал В.А., Стрельчук А.С.**
Разработка методики реконфигурации технических средств ЦХОИ АСУ СН для обеспечения устойчивости их функционирования при воздействии дестабилизирующих факторов

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

62 **Смуров С.В., Волков Г.Г.**
О неприводимых представлениях комплексных и вещественных неабелевых Ли алгебр

69 **Кабышев А.М., Хмара В.В., Маслаков М.П., Хасцаев Б.Д., Кулакова С.В.**
Сигналы и алгоритмы управления устройствами пневмотранспортной системы

77 **Павлов А.А., Романенко Ю.А., Макеев М.И., Павлов Ф.А., Романенко А.Ю.**
Метод защиты информации

81 **Беркович С.Б., Шолохов А.В., Лычагов А.С.**
Потенциально достижимая точность определения азимута на основе комплексирования данных системы наземной навигации, цифровой карты дороги и средств технического зрения

85 **Бугаков И.А., Бугаков А.И., Филиппов А.С., Алексеев С.В., Шульга М.М.**
Обнаружение электронных закладок, использующих радиоканал для приема и передачи информации

90 **Захаров В.Л., Смирнов Д.В., Ключкин А.К.**
Метод селекции орбитальных объектов по результатам обработки неоднородной измерительной информации

93 **Руденко Э.М., Семикина Е.В.**
Методика построения векторной целевой функции расчета маршрутов на графах генетическим алгоритмом

98 **Умников Е.В., Атакищев О.И., Грачёв В.А.**
Применение метода анализа иерархий Саати для оценки эффективности системы защиты информации виртуального полигона

СОВРЕМЕННАЯ МЕДИЦИНА И ФАРМАЦЕВТИКА

104 **Ермаков А.М., Горло О.П., Краснова Ю.В., Вольский В.С., Презент М.А., Царьков А.Н., Руднев Д.С.**
О подходах получения высокочистой натриевой соли люминола (3-аминофталгидразид натрия, 5-амино-2,3-дигидро-1,4-фталазиндион натрия) – основы лекарственного препарата Тамерон

ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

106 **Дранников С.Г.**
Методика оценки удовлетворенности курсантов системой подготовки специалистов в военном вузе

НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ • НАУЧНЫЕ РЕЦЕНЗИИ • ОТЗЫВЫ

112 **Емелин Н.М.**
Подходы к оценке влияния безошибочности действий персонала на надежность эргатических систем

115 **AUTHORS**

117 **ЭТИКА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ**

118 **ТРЕБОВАНИЯ К АВТОРАМ СТАТЕЙ**

Научно-технический журнал

ИЗВЕСТИЯ Института инженерной физики
№1 (63) 2022

Издается с апреля 2006 г. Выходит ежеквартально

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

Главный редактор, председатель редакционного совета и редакционной коллегии

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

Редакционный совет

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

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

Николай Михайлович Емелин
главный научный сотрудник ФГБНУ «Госметодцентр», заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор

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

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

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

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

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

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

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

научно-технический журнал
Известия
ИНСТИТУТА ИНЖЕНЕРНОЙ ФИЗИКИ
№ 1 2022
63

Редакционная коллегия

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

Борис Фёдорович Безродный
доктор технических наук, профессор

Сергей Борисович Беркович
почетный геодезист РФ доктор технических наук, профессор

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

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

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

Сергей Григорьевич Данилюк
доктор технических наук, профессор

Владимир Владимирович Зеленевский
почетный работник науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор

Николай Николаевич Казаков
член Союза писателей России
выпускающий редактор

Олег Павлович Кузнецов
кандидат технических наук, доцент

Александр Ильич Куприянов
доктор технических наук, профессор

Анатолий Викторович Мазин
доктор технических наук, профессор

Алексей Сергеевич Марков
доктор технических наук, старший научный сотрудник

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

Роман Леонидович Мусатов
кандидат технических наук
заместитель главного редактора

Игорь Николаевич Оков
доктор технических наук, профессор

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

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

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

Валерий Николаевич Умников
доктор технических наук, профессор

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

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

Игорь Александрович Бугаков

Вице-президент МОУ «ИИФ» по инновационным проектам, заслуженный изобретатель РФ, почетный работник науки и техники РФ, член Научного совета при Президиуме РАН по методологии искусственного интеллекта и когнитивных исследований, доктор технических наук, профессор

Уважаемые коллеги!

Наука в современном сложном мире играет все более важную роль в познании и преобразовании действительности. Причем технический прогресс изменяет не только среду обитания человека, но и самого человека, порождая как обоснованные надежды на «светлое» будущее человечества, так и не менее обоснованные опасения. Сложность современному этапу развития цивилизации придает противостояние Востока и Запада в целом, растущее геополитическое противоборство России и западных стран. Стремление США под лозунгом «демократии» управлять всем миром, преследуя только свои интересы, применительно к России проявляющееся в непрекращающемся расширении НАТО, усилении влияния на страны бывшего СССР, введении различных санкций и пр., имеет конечной целью ослабить влияние России на мировые процессы и уничтожить ее как самостоятельное государство.

В условиях демонстрируемого США по всему миру приоритета «права силы» первостепенной задачей является укрепление обороноспособности России на основе новейших научных достижений (вспомним слова лауреата Нобелевской премии Фредерика Жолио-Кюри: «Наука необходима народу. Страна, которая ее не развивает, неизбежно превращается в колонию»). Только научные открытия и создаваемые на их основе перспективные технологии и системы вооружения способны отрезвить горячие головы заокеанских «партнеров». Потому своим важнейшим направлением деятельности Институт инженерной физики считает внесение посильного вклада в решение этой задачи на основе собственных инновационных идей, доводя их до реальных устройств, систем и аппаратно-программных комплексов, серийно поставляемых в Вооруженные Силы РФ и другие силовые структуры (большинство разрабатываемых систем и технологий – двойного назначения).

В Институте на практике успешно реализуется идея интеграции науки, образования и производства. Более 10 лет в Институте действует система непрерывного образования, позволяющая выпускникам школ пройти обучение в действующем на базе Института Учебном центре «Интеграция» Московского авиационного института (национального исследовательского университета) и аспирантуре Института с последующей защитой диссертации в диссертационном совете Института. В настоящее время около 100 наших выпускников трудятся в Институте на различных научных и инженерных должностях.

Накопленный опыт такой интеграции с непрерывным развитием необходимой научно-исследовательской и производственно-технологической базы позволил Институту получить одобрение и поддержку администрации городского округа Серпухов, Правительства Московской области и в конце декабря 2021 года в рамках национального проекта «Наука» и региональной программы «Наука в Подмосковье» открыть в Серпухове Технопарк в сфере высоких технологий: «Научно-технологический и фармацевтический производственный комплекс (ТехноИнноватика)». Открытие Технопарка наряду с другими достижениями Института – наш вклад в результаты 2021 года, проведенного в соответствии с Указом Президента РФ как «Год науки и технологий».

С Днем российской науки! Новых научных достижений в познании и преобразовании мира во имя нашей великой России, во имя человека и человечества!

УДК 623.546; 623.468

ГЛОБАЛЬНЫЙ ЧИСЛЕННЫЙ ПОИСК «ЖЕСТКИХ» И «ГОРЯЧИХ» ТОЧЕК АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

GLOBAL NUMERICAL SEARCH FOR «HARD» AND «HOT» POINTS OF THE EARTHS ATMOSPHERE

Сергей Игоревич Миняев
кандидат физико-математических наук
начальник отдела
АО «Корпорация «МИТ»
Адрес: 127273, г. Москва,
ул. Березовая аллея, д. 10
Тел.: 8 (905) 725-11-81

Ксения Олеговна Черепенькина
инженер отдела
АО «Корпорация «МИТ»
Адрес: 127273, г. Москва,
ул. Березовая аллея, д. 10
Тел.: 8(966)136-66-64
E-mail.: cherepenkinak@bk.ru

Аннотация

Под «горячими» точками атмосферы Земли понимаются сочетания плановых геодезических координат (широты и долготы) и времени года, соответствующие таким метеопараметрам атмосферы (в настоящей работе – только высотному профилю давления), при которых достигаются максимальные тепловые нагружения баллистического объекта (БО) на атмосферном пассивном участке траектории (ПУТ) его полета. Аналогичное понятие «жестких» точек атмосферы Земли соответствует максимальным прочностным нагружениям БО на атмосферном ПУТ. В настоящей работе точки атмосферы заданы в вышеуказанном трехмерном пространстве дискретных параметров с фиксированным угловым шагом для плановых геодезических координат, а также с шагом в один месяц. В качестве характеристики тепловых нагружений используется приведенный интегральный тепловой поток, а в качестве характеристики прочностных нагружений – максимальный скоростной напор. В указанных предположениях предложен и численно реализован алгоритм глобального поиска «горячих» и «жестких» точек на основе полного перебора всех точек атмосферы Земли. Проведена опытная оценка затраченного машинного времени в условиях фиксированных траекторно-баллистических характеристик БО.

Ключевые слова: баллистический объект, атмосферный пассивный участок траектории, тепловые нагружения, прочностные нагружения, интегральный тепловой поток, максимальный скоростной напор, метеопараметры атмосферы Земли.

Summary

The "hot" points of the Earth's atmosphere are understood as combinations of planned geodetic coordinates (latitude and longitude) and the time of year corresponding to such meteorological parameters of the atmosphere (in this paper– only the altitude pressure profile), at which maximum thermal loads of a ballistic object (BO) are achieved on the atmospheric passive section of the trajectory (PUT) his flight. A similar concept of "hard" points of the Earth's atmosphere corresponds to the maximum strength loadings of the BO on the atmospheric path. In this paper, the atmospheric points are given in the above three-dimensional space of discrete parameters with a fixed angular step for the planned geodetic coordinates, as well as in one-month increments. As a characteristic of thermal loads, it is used when.

Keywords: ballistic object, atmospheric passive trajectory section, thermal loads, strength loads, integral heat flow, maximum velocity pressure, meteorological parameters of the Earths atmosphere.

1. Введение

Актуальность практического использования понятия «жестких» точек атмосферы частично обоснована в работе [11] и состоит в следующем: для фиксированных условий входа БО в атмосферу ($|\overline{V}_{вх}|$; $\Theta_{вх}$) максимальное значение продольной перегрузки n_x на атмосферном ПУТ в зависимости от систематических[1] отклонений $\Delta\rho(h)$ высотного профиля плотности $\rho(h)$ для некоторой фиксированной точки атмосферы ($\tau_г$, φ, λ) от стандартных $\rho_{CA}(h)$ [4] может варьироваться в пределах до ±3,5 % (что, в свою очередь, может быть существенным при проектировании БО и/или планировании его летных испытаний (ЛИ)).

[1] Могут быть учтены и аналогичные случайные отклонения по выбранному ровню вероятности (что приведет к увеличению вычислительной сложности поиска в 2 раза).

Естественным образом возникает вопрос о глобальной вариации этого параметра. При этом равенство [5]

$$n_x(t) = \frac{\sigma_x q(t)}{g_0},$$

где σ_x – баллистический коэффициент;

$q(t) = \frac{\rho(t)V^2(t)}{2}$ – скоростной напор[2];

$\rho(t)$ – плотность воздуха;

$V(t)$ – модуль вектора скорости в ЗСК;

g_0=9,82 м/с^2

определяет достижение максимума n_x одновременно с максимумом q (что делает близкими исходное определение в [11] и используемое в данной работе).

Актуальность же использования аналогичного понятия «горячих» точек атмосферы в исходном определении [11] (точек, для которых достигается максимум температуры T в некоторой внутренней точке объема БО) на основании численных экспериментов не выявлена. Однако, развивая результаты работы [11], в настоящей работе предложен вариант уточнения исходного понятия за счет использования в качестве показателя теплового нагружения не T, а приведенного (нормированного на некоторую величину, зависящую только от конструктивных характеристик) интегрального теплового потока [8]

$$\hat{Q}_\Sigma = \int_0^{t_{апут}} V^{3,25}(h(t))\rho^{0,5}(h(t))dt,$$

где время полета t отсчитывается от момента t_0 = 0 входа в атмосферу и до момента $t_{апут}$ окончания атмосферного ПУТ;

$h(t)$ – текущая высота.

Обоснованность такого уточнения определяется следующим:

1) В общем случае тепловые потоки, подводимые к и отводимые от БО, связаны равенством [10]

$$q_к + q_р = q_{изл} + q_ш + q_{пл} + q_в + q_{ун}$$

где использованы следующие обозначения составляющих: $q_к$ – конвективная, $q_р$ – радиационная, $q_{изл}$ – излучение с поверхности, $q_ш$ – на прогрев внутренних слоев, $q_{пл}$ – за счет уноса с поверхности при плавлении, $q_в$ – за счет искусственного вдува в пограничный слой, $q_{ун}$ – за счет уноса с поверхности за счет физико-химических превращений;

2) Для рассматриваемых авторами типов БО учитывается, что $q_р \approx 0$ (для скоростей не более 7300,0 м/с [9]), $q_в \approx 0$, $q_k \sim \hat{Q}_\Sigma$ (исходя из определения $\hat{Q}_\Sigma$ в работе [8]), $q_ш \sim T$.

Таким образом, использование $\hat{Q}_\Sigma$ вместо T приводит к большей информативности при проектировании БО и/или планировании его ЛИ, т.к. дополнительно обеспечивает необходимость учета составляющих $q_{изл}$ (зависящей от излучательной способности поверхности БО) и $q_{пл} + q_{ун}$ (зависящей от физико-механических и химических свойств покрытия БО).

Для расчета показателей q_{max} и $\hat{Q}_\Sigma$ в одной точке $(\tau_г, \varphi, \lambda)$ необходимо задаться конкретными исходными данными (ИД) – $(|\overline{V}_{вх}|; \Theta_{вх})$ и σ_x (предполагается постоянным), а для реализации глобального поиска $(\tau_г^{ж}, \varphi^{ж}, \lambda^{ж})$ и $(\tau_г^{г}, \varphi^{г}, \lambda^{г})$ методом перебора необходимо задание сеточного разбиения. При этом каждая итерация расчета связана с численным интегрированием упрощенной системы дифференциальных уравнений полета БО [5]:

$$\begin{cases} h(t) - h(0) = -\int_0^t V(t)\sin(\theta_{вх})dt, \\ V(t) - V(0) = -\int_0^t \frac{\sigma_x \rho(h(t))V^2(t)}{2}dt. \end{cases} \quad (1)$$

Далее в работе:

– в разделе 2 приведена постановка задачи глобального поиска «жестких» $(\tau_г^{ж}, \varphi^{ж}, \lambda^{ж})$ и «горячих» $(\tau_г^{г}, \varphi^{г}, \lambda^{г})$ точек атмосферы Земли;

– в разделе 3 описан способ решения поставленной задачи, проведена проверка «общности» результатов её решения на основе их сравнительного анализа при различных ИД, дана оценка затраченного на расчет времени работы персональной электронной вычислительной машины (ПЭВМ);

– в завершающем разделе 4 сделаны выводы о результатах проведенной работы.

2. Постановка задачи

Для фиксированных ИД $(|\overline{V}_{вх}|; \Theta_{вх})$ и σ_x требуется найти точки $(\tau_г^{ж}, \varphi^{ж}, \lambda^{ж})$ и $(\tau_г^{г}, \varphi^{г}, \lambda^{г})$ атмосферы [3][3] при независимых сеточных разбиениях варьируемых параметров $\varphi \in \{-90º; -80º; \ldots; 90º\}$ и $\lambda \in \{-180º; -170º; \ldots; 170º\}$ с учетом $\tau_г \in \{1; 2; \ldots; 12\}$ (схематично проиллюстрировано на *рисунке 1*).

Провести аналогичный расчет для совокупности ИД, где вариациям подвергнуть каждый параметр.

3. Способ и результаты поиска жестких и горячих точек

Как следует из разделов 1 и 2, для фиксированных ИД (приняты значения $(|\overline{V}_{вх}|$=7200,0 м/с, $\Theta_{вх}$=23º и σ_x=0,0001 м^2/кг) поиск $(\tau_г^{ж}, \varphi^{ж}, \lambda^{ж})$ и

[2] В общем случае в формуле для расчета q [7] должна использоваться воздушная скорость [6], но в данной работе не учитывается ни зональная, ни меридиональная составляющие ветра, и, т.о., воздушная скорость совпадает со скоростью в любой ЗСК.

[3] Могла быть использована и другая модель атмосферы Земли с учетом зависимости ее метеопараметров от геодезических координат и сезона, например [1].

$(\tau_г^г, \varphi^г, \lambda^г)$ состоит в интегрировании

$$\Big(\underbrace{19}_{\substack{\text{по числу точек}\\ \text{разбиения по } \varphi}} \times \underbrace{36}_{\substack{\text{по числу точек}\\ \text{разбиения по } \lambda}} - \underbrace{35\times 2}_{\substack{\text{т.к. зависимость}\\ \text{от } \lambda \text{ в полюсах}\\ \text{вырождается}}}\Big)\times \underbrace{12}_{\substack{\text{по числу}\\ \text{месяцев в году}}} = 7368$$

раз системы (1) и определении для каждого из ее численных решений показателей q^i_{max} и $\hat{Q}^i_{\Sigma}$, i=1; 2; …; 7368. Результаты расчетов представлены в *таблице 1*.

Примечание к таблице 1. На полученные значения влияют многие факторы, в том числе:

– тип используемого метода интерполяции табличных функций;

– подробность используемой модели движения БО на ПУТ (в частности, в системе (1) не учтена сила гравитационного притяжения Земли);

– метод и шаг интегрирования;

– учет/неучет зависимости σ_x от числа Маха и высоты h.

Однако принятые в работе допущения позволяют получить достоверную сравнительную количественную оценку.

Указанная в разделе 1 проверка «общности» этих результатов заключается в их сравнении с аналогичными результатами, полученными при варьировании ИД (для примера выбрано два набора: $|\overline{V}_{вх}|$=7000,0 м/с, $\Theta_{вх}$=30º и σ_x=0,00017 м²/кг; $|\overline{V}_{вх}|$=6000,0 м/с, $\Theta_{вх}$=46º и σ_x=0,00022 м²/кг). Аналогичный расчет подтверждает, что и для этих ИД:

$$(\tau_г^{ж}, \varphi^{ж}, \lambda^{ж})=(9;\ -90º;\ \forall);$$
$$(\tau_г^г, \varphi^г, \lambda^г)=(1;\ -70º;\ -40º).$$

Таким образом, полученные точки являются глобальными – при полете в их окрестностях на нисходящей атмосферной части ПУТ вне зависимости от условий входа в атмосферу и баллистического коэффициента БО будет испытывать максимальные тепловые и прочностные нагружения.

На глобальный поиск $(\tau_г^{ж}, \varphi^{ж}, \lambda^{ж})$ и $(\tau_г^г, \varphi^г, \lambda^г)$ затрачено ≈13,4 ч времени работы ПЭВМ (с характеристиками: процессор Intel Core i3-3240 2x3,4 ГГц, оперативная память 4,0 Гб) при следующих условиях:

– численное решение уравнений (1) прово-

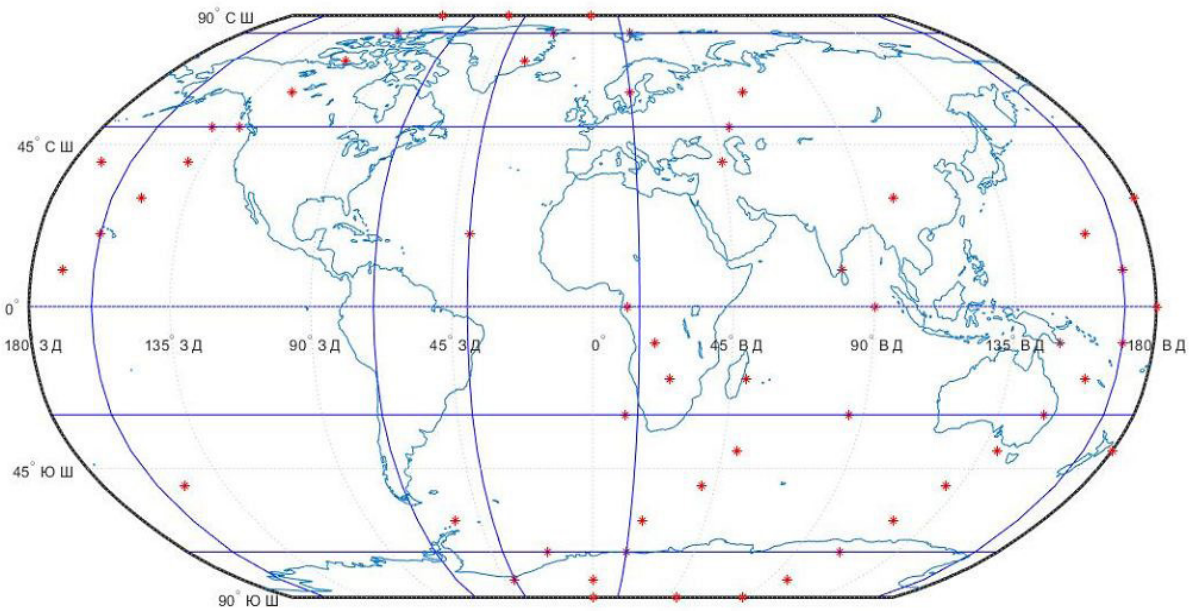


Рис. 1. Сеточное разбиение Земной поверхности по широте и долготе

Таблица 1

Результаты поиска «жесткой» и «горячей» точек атмосферы Земли

Показатель	Минимальное значение	Максимальное значение	Размах (в % от среднего арифметического минимального и максимального значений)
q^i_{max}, кг/м/с²	~5,07·10⁶	~5,86·10⁶ (достигнуто в $(\tau_г^{ж}, \varphi^{ж}, \lambda^{ж})$=(9; -90º; $\forall$) на высоте h ≈ 8,05 км)	±7,2 %
$\hat{Q}^i_{\Sigma}$, б/р	~0,957·10¹³	~1,045·10¹³ (достигнуто в $(\tau_г^г, \varphi^г, \lambda^г)$=(1; -70º;-40º))	±4,4 %

дилось в среде Matlab версии R2017b методом Рунге-Кутты с фиксированным шагом $\Delta t=0{,}01$ с, общее число строк программного кода составило 126 (с учетом применения стандартной функции интерполяции табличной зависимости $\rho(h)=\rho_{CA}(h)+\Delta\rho(h)$ сплайнами 3-го порядка);

– оценка затраченного времени проведена с помощью стандартных функций «tic», «tok» [2].

4. Выводы

На основе изложенного в разделах 1-3 можно сделать следующие выводы:

– глобальные вариации количественных характеристик аэродинамического воздействия на высокоскоростные БО в зависимости от географического положения их атмосферного ПУТ и сезона являются значительными и составляют ±7,2 % для прочностных нагружений и ±4,4 % для тепловых нагружений; таким образом, они могут быть учтены при планировании ЛИ БО [8] и/или при назначении коэффициентов безопасности по прочности, текучести материалов [12], а также температурных ограничений [13] в ходе проектирования БО;

– полученные оценки являются универсальными в смысле независимости от баллистического коэффициента БО.

Литература

1. ГОСТ Р 53460-2009. Глобальная справочная атмосфера для высот от 0 до 120 км для аэрокосмической практики. Параметры.
2. Дьяконов В.П. MATLAB. Полный самоучитель. М.: ДМК Пресс, 2021. 768 с.
3. Глобальная справочная модель атмосферы на высотах от 0 до 100 километров для баллистического обеспечения ракетно-космической практики (одобрена Протоколом НТС ВПК РФ от 24.01.2017 № ВПК(НТС)-1(82)пр).
4. ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартная. Параметры.
5. Разоренов Г.Н. Лекции по механике полета баллистических ракет. М.: Машиностроение-Полет, 2019. 564 с.
6. ГОСТ 20058-80. Динамика летательных аппаратов в атмосфере. Термины, определения и обозначения.
7. ГОСТ 23281-78. Аэродинамика летательных аппаратов. Термины, определения и буквенные обозначения.
8. Куреев В.Д., Миняев С.И., Черниченко В.Б. Критерии формирования траекторий исследовательских баллистических ракет // Тезисы доклада на XXII Научно-технической конференции ученых и специалистов, посвященной 60-летию полета Ю.А. Гагарина, 75-летию ракетно-космической отрасли, основанию ПАО «РКК «Энергия», г. Королев, 2021. С.465-467.
9. Никитин П.В., Сотник Е.В. Воспроизведение конвективно-лучистого теплообмена, сопутствующего входу космических аппаратов в атмосферы планет со второй космической скоростью // Электронный журнал «Труды МАИ», 2011. Вып.№42.
10. Панкратов Б.М. Основы теплового проектирования транспортных космических систем. М.: Машиностроение, 1988. 304 с.
11. Миняев С.И. О терминологических и методических направлениях совершенствования понятия области входа боевого блока в атмосферу // Сборник «Труды «ФГУП «НПЦАП», 2021, принята к опубликованию.
12. Лизин В.Т., Пяткин В.А. Проектирование тонкостенных конструкций. М.: Машиностроение, 1976. 408 с.
13. ГОСТ 2.114-2016. ЕСКД. Технические условия.

УДК 629.191

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПЕРЕХВАТА ТЕЛ ПРИРОДНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В ПЛОТНЫХ СЛОЯХ АТМОСФЕРЫ

ASSESSMENT OF THE POSSIBILITIES OF INTERCEPTION OF BODIES OF NATURAL ORIGIN IN THE DENSE LAYERS OF THE ATMOSPHERE

Алексей Игоревич Алаторцев
доктор технических наук
начальник управления
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,
Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: 8 (903) 183-94-86
E-mail: alexalat@yandex.ru

Андрей Николаевич Фуров
кандидат технических наук
заместитель начальника кафедры
филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел.: 8 (925) 791-29-42
E-mail: afurov@gmail.ru

Иван Сергеевич Нищаков
преподаватель
филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел.: 8 (916) 698-52-91
E-mail: nishackov.iwan@yandex.ru

Аннотация
Статья посвящена вопросам перехвата тел природного происхождения за счет применения средств атмосферного перехвата. Представлена схема перехвата тел природного происхождения при различных углах упреждения. Описано воздействие поперечной перегрузки на средства атмосферного перехвата при осуществлении перехвата тел природного происхождения.
Ключевые слова: перехват, средство атмосферного перехвата, тело природного происхождения, угол упреждения.

Summary
The article is devoted to the interception of bodies of natural origin through the use of complex technical systems. The scheme of interception of bodies of natural origin at different angles of lead is presented. The effect of transverse overload on a complex technical system when intercepting bodies of natural origin is described.
Keywords: interception, complex technical system, body of natural origin, the angle of anticipation.

Периодическое падение тел природного происхождения (ТПП) на поверхность Земли свидетельствует о том, что необходимо обеспечить перехват данных тел с целью недопущения падения их на поверхность Земли, что может повлечь за собой значительные последствия [1]. В связи с этим, актуализируется необходимость применения сложных технических систем с целью перехвата в плотных слоях атмосферы ТПП. Обнаружение ТПП с помощью современных систем обнаружения необходимо осуществлять на значительных расстояниях – до нескольких тысяч километров. С момента обнаружения ТПП, за ним осуществляется непрерывное наблюдение, т.е. определение параметров движения и прогнозирование траекторий полета. Под перехватом понимается применение средств атмосферного перехвата (САП) с целью уничтожения ТПП, в зависимости от массогабаритных характеристик. Перехват может быть организован как на дальних подступах к объекту инфраструктуры, так и на ближних и средних, а также в пределах высот, где эффективно применение органов управления САП [2].

Значительную часть времени САП наводится на цель за счет органов управления при определенных ограничениях на время полета и величины перегрузок. Ввод ограничений существенно зависит от принятого метода наведения САП.

Под методом наведения необходимо понимать в первую очередь, выбор направления движения САП, а также вторую – формирование управляющих команд, обеспечивающих движение САП в заданном направлении. Во многих случаях от выбора направления движения зависит время перехвата, а также значения пере-

грузок, особенно поперечных, действующих на САП в процессе сближения с ТПП. Можно утверждать, что наиболее упрощенным методом наведения будет метод, когда направление движения САП выбирается вдоль линии визирования на цель в определенный момент времени.

Для осуществления наведения по указанному методу не требуется ни значений параметров, ни прогнозирования движения ТПП, необходимо только непрерывное отслеживание вектором скорости САП линии визирования на цель. Однако, «простота» оборачивается труднопрогнозируемостью времени до момента встречи (а время управляемого движения САП ограничено) и необходимостью выдерживания больших значений перегрузок, особенно при сближении САП с ТПП. Существует возможность уменьшения значений максимальных перегрузок при поражении ТПП сзади, вдогон, но в реальной обстановке при фактическом расположении САП на местности не всегда возможно.

Более благоприятные условия для САП обеспечиваются при осуществлении перехвата по методу наведения в упрежденную точку встречи, т.е. в определенную точку пространства, в которой через промежуток времени окажется САП и ТПП. Данную точку, возможно, определить так, чтобы движение САП к ней осуществлялось прямолинейно. Тогда движение возможно за минимальное время, и при минимальных значениях перегрузки. Однако, расплатой за это служит достаточно сложный и трудоемкий способ определения направления на упрежденную точку встречи, требующий измерений параметров движения САП и ТПП, а также прогноз их движения до момента встречи. Поскольку измерение параметров и прогнозирование движения обычно сопровождается значением ошибки, которое зависит от времени встречи САП и ТПП, то очевидно, что для успешной реализации данного метода наведения необходимо осуществлять периодические сеансы уточнения направления движения САП. Современные средства проведения телеметрических и траекторных измерений, а также инновационные вычислительные средства, позволяют определять параметры движения и прогнозировать траектории ТПП. Далее осуществляется выработка команды управления движением САП, начиная с момента начала движения, до момента встречи с ТПП. Безоговорочно, изменение траектории движения ТПП затрудняет прогнозирование движения.

Осуществляя модификацию метода наведения по кривой погони, можно избежать возможного резкого увеличения значений поперечных перегрузок на конечном участке траектории, и сблизить его с методом наведения в упрежденную точку встречи. Принцип модификации заключается в том, что в течение всего наведения вектор скорости направляется под некоторым углом к линии визирования на цель, т.е. с некоторым упреждением в сторону точки встречи САП с ТПП. В большинстве случаев, угол упреждения может быть постоянным в течение всего времени наведения. Для пояснения преимуществ, которые получены с помощью рассмотренной модификации, введем в рассмотрение угол упреждения i – угол между линией визирования на цель и текущим вектором скорости V (*рисунок 1*).

Рассмотрим траектории движения САП и ТПП в допущении, что оба объекта движутся в одной вертикальной плоскости, ТПП движется горизонтально, прямолинейно и равномерно, а САП наводится на нее при различных постоянных углах упреждения, включая и значение $i = 0$. Из *рисунка 1* видно, что с увеличением угла и кривизна траектории САП уменьшается вплоть до нуля, когда траектория становится прямолинейной (наведение в упрежденную точку встречи). Покажем теперь, что для криволинейной траектории ($i > 0$) при подлете к цели, угловая скорость вращения вектора скорости, а, следовательно, и поперечные перегрузки меньше, чем при наведении по кривой погони при $i = 0$. Введем в рассмотрение следующие кинематические параметры, характеризующие процесс наведения:

V и $V_{тпп}$ – векторы скорости САП и ТПП;

Θ и $\Theta_{тпп}$ – углы наклона векторов V и $V_{тпп}$ к местному горизонту;

D – расстояние между САП и ТПП;

f – угол наклона линии визирования к местному горизонту;

i – угол упреждения.

Относительную скорость сближения САП с ТПП при $V_{тпп}=const$, $i = const$ и $V=const$, будем характеризовать величиной изменения относительной дальности, спроектировав на линию визирования разность скоростей САП и (с учетом желаемого знака D):

$$\dot{D} = V_{ТПП} \cdot \cos f - V \cdot \cos i, \qquad (1)$$

а угловую скорость вращения линии визирования определим из выражения для трансверсальной составляющей скорости линии визирования:

$$\dot{f} = \frac{-V_{тпп} \cdot \sin f + \sin i}{D}. \qquad (2)$$

Поперечная перегрузка, действующая на САП, приближенно может характеризоваться выражением:

$$n_y \approx \frac{V \cdot \dot{\Theta}}{g_0}, \qquad (3)$$

или при $i=const$, когда $\dot{\Theta} = \dot{f}$ выражением:

$$n_y \approx \frac{V}{g_0}\left(\frac{-V_{тпп} \cdot \sin f + V \cdot \sin i}{D}\right) = \frac{V \cdot V_{тпп}}{g_0 \cdot D}(\sin f - p \cdot \sin i) \qquad (4)$$

где $p=V/V_{тпп}$.

Для наведения по методу погони $i = 0$. Тогда из (4) следует:

$$n_y^{пог} \approx \frac{V \cdot V_{тпп}}{g_0 \cdot D} \sin f \qquad (5)$$

Поделив (4) на (5), получим

$$\frac{n_y}{n_y^{пог}} = \left(1 - \frac{p \cdot \sin i}{\sin f}\right). \qquad (6)$$

Полученное выражение имеет смысл, когда правая его часть положительна. Но из физического и геометрического смысла также следует, что правая часть выражения (6) по величине не может превосходить единицы [3]. А это означает, что поперечные перегрузки при наведении в упрежденную точку меньше, чем при наведении по методу погони. Можно также сказать, что в условиях определенных соотношений скоростей САП и ТПП, и при определенном выборе упреждения по мере сближения с целью, поперечная перегрузка асимптотически убывает, а траектория перехватчика приближается к прямолинейной. Таким образом, при реализации метода наведения, не требующего измерения параметров движения и прогнозирования траектории ТПП, возникает задача рационального выбора упреждения.

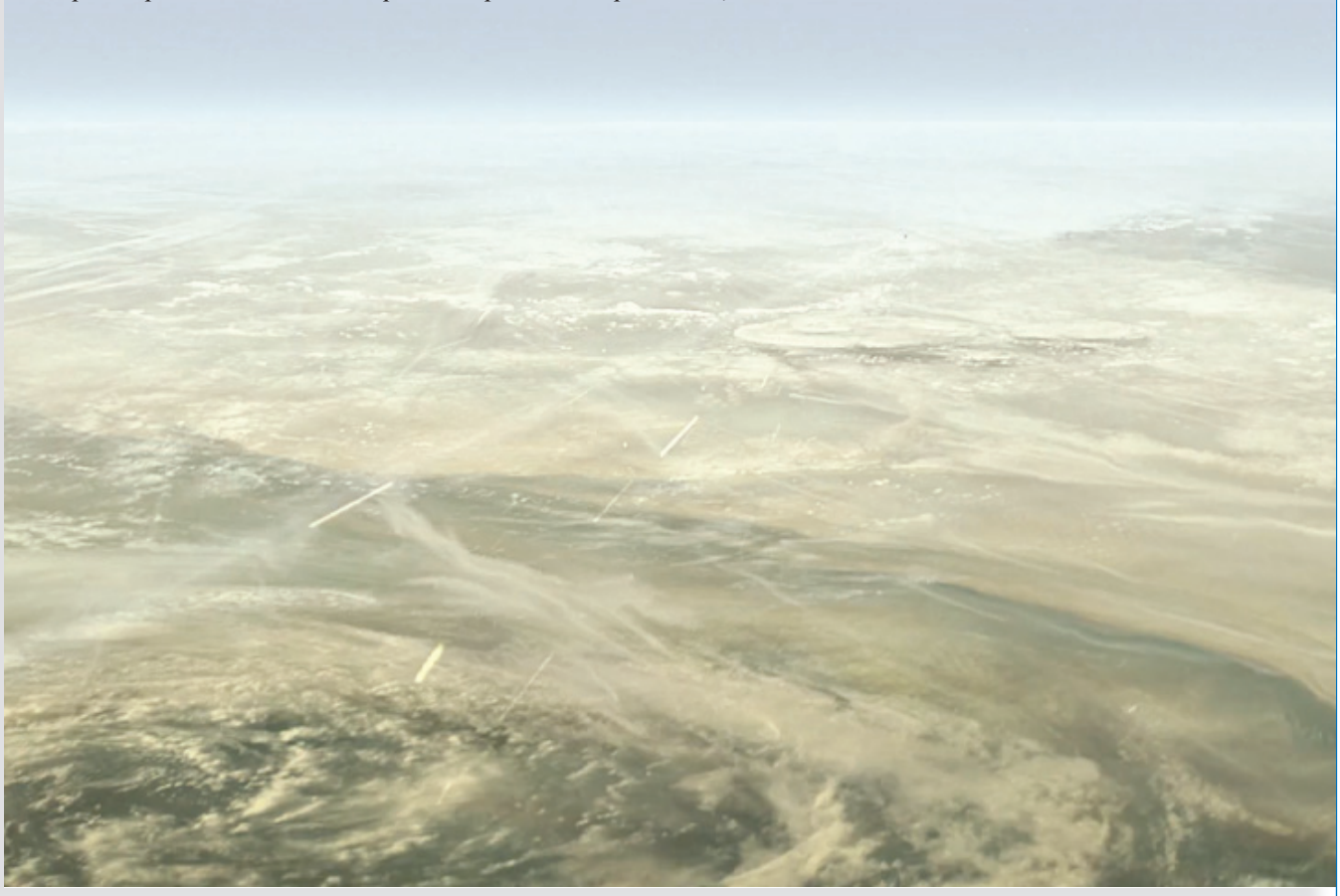
На основании описанного, можно сделать вывод, что предложенный метод позволяет повысить возможности перехвата ТПП в плотных слоях атмосферы за счет применения современных САП, что обеспечит уничтожение различных ТПП, с целью недопущения падения их на поверхность Земли.

Литература

1. Алаторцев А.И., Чиграй А.Г., Фуров А.Н. Методический подход к оценке сохраняемости космических летательных аппаратов при воздействии на них тел природного происхождения // Известия Института инженерной физики, 2021. №3 (61). С.33-35.

2. Смирнов Д.В., Кузнецов О.П., Алаторцев А.И., Фуров А.Н. Методический подход к решению задачи оценки живучести гиперзвуковых летательных аппаратов в условиях противодействия. В сборнике «Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия». X Международная НПК. Международный научный институт «Educatio». Новосибирск, 2015. С.149-152.

3. Ануреев И.И. Оружие противоракетной и противокосмической обороны. М.: Воениздат, 1971. 303 с.



УДК 629.78

ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КРИТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ В ЗАРЯДЕ ВМ, ЗАКЛЮЧЕННОМ В ОБОЛОЧКУ, ПРИ РАЗРЕЗАНИИ ПОСЛЕДНЕЙ С ПОМОЩЬЮ УКЗ

GRAPH–ANALYTICAL EVALUATION OF THE CRITICAL CONDITIONS OF EXCITATION OF DETONATION IN A CHARGE OF EXPLOSIVE MATERIAL ENCLOSED IN A SHELL WHEN THE LAST IS CUT WITH THE HELP OF AN ELONGATED SHAPED CHARGE

Сергей Владимирович Смуров
почетный работник науки и техники РФ
доктор технических наук, профессор
Первый Вице-президент Института – Главный конструктор
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93
E-mail: svs_iif@mail.ru

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

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

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

Аннотация
В статье рассмотрен принцип расчета критических условий инициирования детонации в заряде ВМ, заключенном в металлический корпус, при разрезании его удлиненным кумулятивным зарядом.
Ключевые слова: удлиненный кумулятивный заряд; взрывчатый материал; кумулятивный нож; условия инициирования; критические параметры детонации; ударная сжимаемость.

Summary
The article considers the principle of calculating the critical conditions for detonation initiation in a explosive charge enclosed in a metal case, when it is cut by an elongated shaped charge.
Keywords: elongated shaped charge; explosive material; cumulative knife; initiation conditions; critical detonation parameters; shock compressibility.

В последние годы интересы практики настоятельно диктуют необходимость разработки расчетной, инженерной методики прогнозирования инициирующей способности удлиненных кумулятивных зарядов бризантных ВВ (УКЗ), применительно к зарядам из различных взрывчатых материалов (ВМ – взрывчатых веществ и составов, твердых ракетных и специальных топлив), заключенных в оболочки, разрезаемые с помощью этих УКЗ.

Такая потребность вызвана главным образом решением практических задач аварийного выключения ракетного двигателя твердого топлива (РДТТ) на активном участке полета ракеты путем «обнуления» тяги двигателя отсечкой его соплового блока или вырубкой окон в соплах противотяги, а также реализацией крупномасштабных работ по демонтажу, расснаряжению и утилизации большого количества боеприпасов (БП) различного назначения. Вследствие много-

образия способов и типа снаряжения, габаритов и конструкций БП единого оптимального метода расснаряжения не существует. Тем не менее, на практике широкое применение нашел метод взрывной резки корпусов БП с помощью устанавливаемых на них УКЗ. Резка и разделение корпуса осуществляется путем формируемого при взрыве УКЗ высокоскоростного воздействия кумулятивного ножа, а также дополнительного ударного, термического и осколочного воздействий. Заряд ВМ при этом не должен детонировать.

В общем случае разрезаемые оболочки могут быть как из металлических, так и из неметаллических материалов; заряды ВМ могут быть либо плотно «посажены» в оболочку, либо с воздушным зазором, либо между зарядом и оболочкой могут быть размещены всевозможные полимерные материалы (пенопласты, полипропилен, полиэтилен и др.). Заметим сразу, что в чисто аналитическом виде подобная задача на достигнутом уровне развития теории высокоскоростного удара и теории ударных волн в плотных средах едва ли может быть решена. Поэтому должны рассматриваться лишь частные случаи, отвечающие реальным конструктивным схемам, обеспечивающим экстремальное нагружение заряда ВМ.

Будем рассматривать следующую схему (*рисунок 1*): УКЗ разрезает оболочку, за которой находится в непосредственном контакте заряд ВМ. Воспользуемся физической моделью [1,2,3], согласно которой возбуждение детонации в заряде ВМ при внедрении в него осколка обусловлено действием образовавшейся в заряде ударной волны (УВ), за фронтом которой создаются условия для быстрого протекания реакций взрывчатого превращения.

В результате интерференции образующихся при этом волн сжатия во взрывчатом веществе создается очаг инициирования, располагающийся на некотором удалении от границы раздела «оболочка – ВМ». Этот очаг и является источником образования стационарной детонационной волны. Как показано в [4] «глубина заложения» этого очага составляет от десятых долей миллиметра до 1-2 мм, если речь идет о критических условиях возбуждения детонации мощных бризантных ВВ.

Количественная химико-кинетическая теория этого процесса чрезвычайно сложна и поэтому до настоящего времени окончательно не разработана. Однако, как показывает опыт, для практики вполне достаточно характеризовать предельные условия инициирования детонации одной из таких интегральных характеристик, как минимальные давление $p_в^*$ и массовая скорость $u_в^*$ во фронте УВ, способной возбудить детонацию. Такая волна в литературе названа инициирующей ударной волной (ИУВ). В качестве примера на *рисунке 2* приведены зависимости $p_в^*(d_и)$ для таких типовых мощных гексогенсодержащих ВВ, как А-IX-1, А-IX-2 и вещество «В» (здесь $d_и$ – диаметр начального очага инициирования).

Возбуждение любого взрывчатого превращения есть процесс не детерминированного, а стохастического характера. Поэтому в строгой постановке зависимости $p_в^*(d_и)$, показанные на *рисунке 2*, должны быть представлены в виде не одной кривой, а некоторых «коридоров», в пределах которых вероятность ударного возбуждения детонации возрастает от нуля до единицы. Однако, как показывает опыт, ширина этих «коридоров» крайне мала.

Дальнейшая задача сводится к определению начального давления $p_в$ на фронте УВ при входе ее в заряд ВМ и диаметра $d_и$ начального очага инициирования.

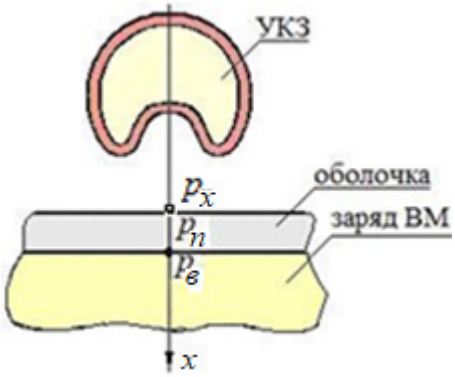


Рис. 1. Схема разрезания оболочки заряда ВМ удлиненным кумулятивным зарядом

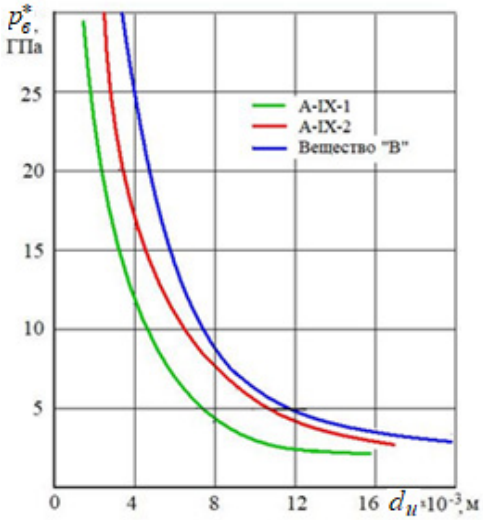


Рис. 2. Зависимости $p_в^*(d_и)$ для некоторых гексогенсодержащих ВВ

Исходя из механизма внедрения кумулятивного ножа в преграду и возникающей при этом волновой картины, можно считать, что максимальное давление в преграде развивается непосредственно у дна каверны. Каждый элемент кумулятивного ножа, внедряясь в преграду, бьет по дну каверны и создает в преграде ударную волну с начальным давлением p_x во фронте, значение которого однозначно определяется скоростью ножа и параметрами ударной сжимаемости соударяющихся тел по зависимости [5]:

$$p_x = \frac{(1-\chi\frac{x}{l_p})^2 u_г^2}{\left\{\sqrt{\frac{1}{\rho_H}\left[1-(1+\frac{p_H}{A_H})^{-1/m_H}\right]}+\sqrt{\frac{1}{\rho_п}\left[1-(1+\frac{p_п}{A_п})^{-1/m_H}\right]}\right\}^2}, \qquad (1)$$

где p_x – давление в рассматриваемом сечении каверны;

χ – безразмерный градиент скорости по ножу;

l_p и $u_г$ – глубина внедрения и скорость головного элемента ножа соответственно;

x – рассматриваемое сечение;

$\rho_н$ и $\rho_п$ – плотности материалов ножа и преграды оболочки заряда ВМ соответственно;

$A_н$, $A_п$, $m_н$, $m_п$ - константы уравнений ударной сжимаемости (для материалов ножа и преграды соответственно), записанных в форме Тэта [1]:

$$p = A\left[\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^n - 1\right], \qquad (2)$$

где ρ - плотность материала, ударно сжатого до давления p;

ρ_0 - начальная плотность материала.

Поскольку в реальных конструкциях толщины разрезаемых оболочек сравнительно невелики, затуханием ударной волны в них при проведении инженерных расчетов можно пренебречь и полагать, что $p_п \approx p_x$.

Строго говоря, из теории твердого тела известно, что под воздействием УВ в преграде возникают нормальные и касательные напряжения. В реальных условиях кумулятивный нож приводит материал преграды в сложное напряженное состояние. Однако без существенной ошибки при решении поставленной задачи можно считать волну сжатия одноразмерной, т.е. учитывать только нормальную составляющую давления. Заметим, что зависимость (1) определяет именно эту составляющую общего давления, развиваемого в преграде кумулятивным ножом УКЗ.

Глубина l_p внедрения кумулятивного ножа в преграду для УКЗ нормального (правильнее - нормированного) ряда в медных оболочках может быть оценена по зависимости [5]:

$$\frac{l_\rho}{d} = 10^2 \cdot \left(\frac{\bar{u}_H^2}{\rho_п \sigma_{вп}}\right)^{1/3} \cdot (1+\varepsilon), \qquad (3)$$

где $\bar{u}_H = \frac{u_г + u_x}{2}$ - средняя скорость кумулятивного ножа;

u_x - скорость «хвостового» элемента ножа;

$\sigma_{вп}$ - предел прочности материала преграды при растяжении;

d - наружный диаметр (калибр) УКЗ;

ε - относительная глубина откола.

Отклонение расчетных значений l_p/d от опытных не превышает, как правило, ±10%. Объясняется это, по всей вероятности, тем, что в расчетах по зависимости (3) используются справочные значения $\sigma_{вп}$, определяемые на практике при статических условиях нагружения, и трудностями в определении значений ε.

Таким образом, для решения задачи по оценке критических условий ударного возбуждения детонации заряда ВМ, прикрытого оболочкой (в том числе и при воздействии кумулятивного ножа УКЗ) необходимо иметь:

- экспериментально установленную зависимость $p_в^*(d_u)$ для исследуемого ВМ;
- характеристики ударной сжимаемости ВМ, материала оболочки и материала кумулятивного ножа;
- кинематические характеристики кумулятивного ножа ($u_г$, χ, l_p).

Вполне естественно, что для уверенного прогнозирования возможности (или невозможности) возбуждения взрыва снаряжения реального изделия необходимо в качестве инициатора детонации мысленно выбирать УКЗ несколько более крупного калибра, чем заряд, рассчитанный по зависимости (3).

Как правило, расчеты проводят для двух-трех выбранных УКЗ из нормированного ряда по возрастающим калибрам.

Для выбранных типов УКЗ рассчитывают по зависимости (1) максимальные значения давлений p_x на входе УВ из разрезаемой оболочки в заряд ВМ.

Для того, чтобы определить начальное давление $p_в$ в заряде ВМ, непосредственно контактирующим с оболочкой, необходимо решить задачу о переходе УВ из одной плотной среды в другую (из оболочки в заряд ВМ). Наиболее просто эта задача решается графоаналитическим способом [1]. Вполне очевидно, что при достижении значения $p_в^*$, в заряде ВМ будет надежно возбуждаться взрывчатое превращение в форме детонации. Для некоторых ВМ значения $p_в^*$ определены экспериментально [2,4] (см., например, *рисунок 2*).

Теперь, чтобы окончательно решить вопрос о возбуждении (или не возбуждении) детонации в заряде ВМ, необходимо определиться с диаметрами d_u начального очага инициирования.

Быстровым П.А. экспериментально установлена конфигурация зоны формирования прорези в преграде от кумулятивного ножа УКЗ. На *рисунке 3* представлена эта конфигурация.

Для этой конфигурации получены следующие эмпирические зависимости:

$$d_n = 1{,}13\sqrt{l \bullet \delta_k};$$

$$d_c = 5\delta_k;\ B = d_k + 2\delta_{об};\ F = d;\ C = 0{,}25 d_k;$$

$$\gamma = arctg\left(\frac{\sqrt{d_k \bullet h - h^2}}{0{,}75 d_k - h}\right).$$

Вероятно, в первом приближении, можно было бы принять за величину начального очага инициирования параметр d_c или d_n. Однако из приведенных выше зависимостей следует неверное, в общем-то, утверждение о том, что все параметры зоны формирования КН (d_n, d_c, B, F, C, γ) связаны только с геометрическими размерами УКЗ и не зависят от материалов разрезаемых преград.

Более строгим нам представляется иной подход к оценке параметра d_u. Будем условно полагать, что в качестве величины d_u можно рассматривать ширину прорези (обозначим ее λ_u, образуемой кумулятивным ножом в разрезаемой преграде, причем сама по себе величина λ_u определяется по результатам прямого эксперимента.

Если нанести на график $p_в^*(d_u)$ (*рисунок 2*), перейдя от d_u к λ_u, точки А, В, С, характеризующие условия нагружения ($p_в$ и λ_u) заряда ВМ при взрыве каждого из рассмотренных УКЗ, то можно осуществить прогнозирование их инициирующей способности.

На *рисунке 4* в качестве примера показаны результаты расчетов для конкретной мишенной обстановки, соответствующей схеме, приведенной на *рисунке 1* из предположений:

- оболочка выполнена из сплава АМг-6 и имеет толщину 5 мм;
- за оболочкой располагается заряд взрывчатого вещества (вещество «В» - сплав тротила с гексогеном в соотношении 40:60 с добавлением 1% (сверх 100%) флегматизатора).

Расчеты проведены при следующих значениях параметров:

l_{p1}=7,6 · 10^{-3}м; $u_{г1}$=2540 м/с; χ_1=0,58; λ_{u1}=1,5 · 10^{-3} м;
l_{p2}=9,5 · 10^{-3}м; $u_{г2}$=2570 м/с; χ_2=0,65; λ_{u2}=1,8 · 10^{-3} м;
l_{p3}=14,3 · 10^{-3}м; $u_{г3}$=3350 м/с; χ_3=0,68; λ_{u3}=3,2 · 10^{-3} м.

(индексы «1», «2», «3», присвоены параметрам УКЗ калибрами 4,2; 5 и 7 мм соответственно).

	l_p, мм	$u_г$, м/с	χ	λ_u, мм
УКЗ-4,2	7,6	2540	0,58	1,5
УКЗ-5,0	9,5	2570	0,65	1,8
УКЗ-7,0	14,3	3350	0,68	3,2

Нетрудно видеть, что УКЗ калибрами 4,2 и 5 мм, пробивная способность которых значительно превышает толщину разрезаемой алюминиевой оболочки (δ_n=5 мм), не способны возбудить детонацию в заряде вещества «В», залитого непосредственно в оболочку. УКЗ-7 может с равной вероятностью инициировать либо не инициировать детонацию в заряде ВВ.

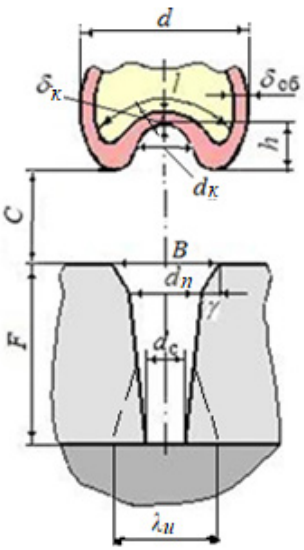


Рис. 3. Конфигурация зоны формирования прорези в преграде от кумулятивного ножа

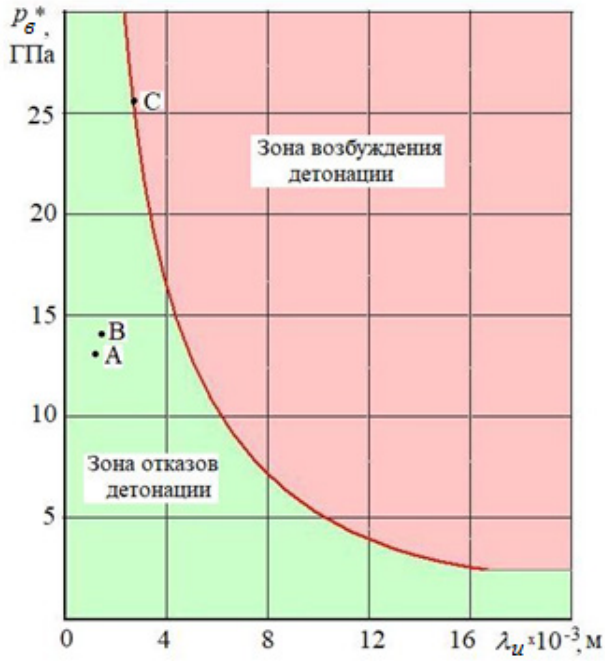


Рис. 4. Результаты расчетов для конкретной мишенной обстановки Оболочка АМ$_г$-6, δ_n=5 мм, ВМ – вещество «В»; т.А – для УКЗ-4,2; т.В – для УКЗ-5; т.С – для УКЗ-7

По поводу сказанного необходимо сделать два важных замечания.

1. Строго говоря, употребление λ_u вместо d_u не совсем корректно, поскольку при цилиндрическом очаге нагружения ВМ образуется боковая волна разгрузки (БВР) с центральной симметрией, а при нагружении ремнеобразным кумулятивным ножом - БВР с линейной симметрией. В последнем случае условия возбуждения детонации в ВМ, естественно, несколько более благоприятны.

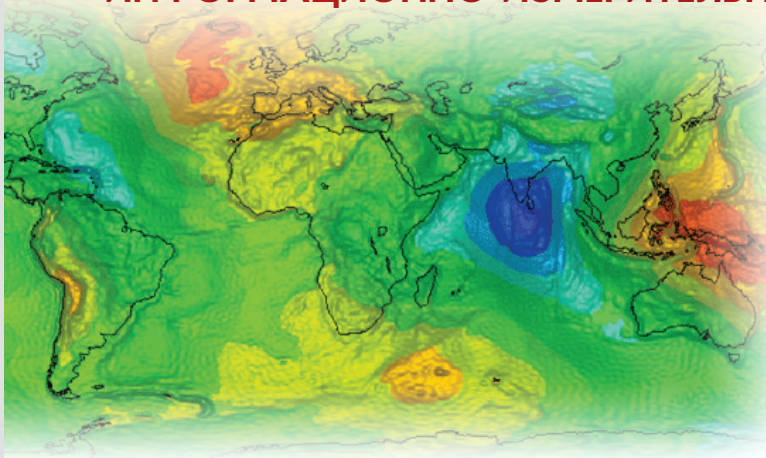
2. С другой стороны, конечная ширина щели, фиксируемая в эксперименте несколько больше, чем истинная ширина λ_u первоначального очага инициирования. Как показывает опыт уширение отверстия в преграде, пробиваемой осколком, есть непременный результат последней стадии процесса высокоскоростного удара - стадии пластического течения материала преграды и образования откольной пробки.

Детальный анализ показывает, что из этих двух противоборствующих факторов превалирующее значение имеет второй, т.е. что выполненные графоаналитические расчеты дают верхнюю оценку критических условий возбуждения заряда ВМ, расположенного за однослойной металлической преградой.

В еще большей степени это относится к таким конструктивным схемам, когда между основной преградой и зарядом ВМ располагается слой какого-либо волногасителя (пенопласт, полипропилен, полиэтилен и т.п.).

Литература

1. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. Изд. 3-е, перераб. В 2-х т. Т.1. М.:Физматлит, 2002. 832 с.
2. Шехтер Б.И. Челышев В.П. Об определении некоторых характеристик очага инициирования детонации ударными волнами / В сб. Взрывное дело.М.: Недра, 1966.
3. Mader Ch.L / Shock and Hot Spot Jnitiation of Homogenous Explosives, Phys Fluids, 1963, V.6. №3.
4. Соловьев В.С. Некоторые особенности ударно-волнового инициирования взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва, 2000. Т.36. №6. С.65-75.
5. Ефанов В.В., Кузин Е.Н., Тимофеев В.Н., Челышев В.П. Устройства и системы пироавтоматики летательных аппаратов на основе линейных кумулятивных зарядов // Полет, 2003. №10. С.42-49.



УДК 629.3.051 + 519.876.5

СИНТЕЗ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ТРАНСФОРМАНТ АНОМАЛЬНОГО ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ С УЧЕТОМ УСЛОВИЯ ЕГО ПОТЕНЦИАЛЬНОСТИ

SYNTHESIS OF SIMULATION MODELS OF TRANSFORMANTS OF THE ANOMALOUS GRAVITATIONAL FIELD OF THE EARTH, TAKING INTO ACCOUNT THE CONDITION OF ITS POTENTIALITY

Сергей Борисович Беркович
доктор технических наук, профессор
начальник управления
навигационно-геодезических систем
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210 Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967) 35-31-93
E-mail: naviserp5@iifmail.ru

Николай Иванович Котов
кандидат технических наук, профессор
заместитель начальника управления
навигационно-геодезических систем
МОУ «ИИФ»

Алексей Викторович Шолохов
доктор технических наук, профессор
ведущий научный сотрудник управления
навигационно-геодезических систем
МОУ «ИИФ»

Аннотация

Предложен подход к формированию случайных реализаций трансформант аномального гравитационного поля (возмущающего потенциала, аномалии силы тяжести, уклонений отвесной линии, горизонтальных градиентов силы тяжести). В качестве моделей трансформант используются двумерные тригонометрические ряды. Рассмотрены условия достижения требуемых характеристик пространственной изменчивости реализаций и самосогласованности. Приводится пример вычисления реализаций трансформант и оценки соответствия характеристик пространственной изменчивости заданным.

Ключевые слова: аномальное гравитационное поле Земли, трансформанты, возмущающий потенциал, аномалия силы тяжести, уклонение отвесной линии, градиент силы тяжести, самосогласованная модель.

Summary

The paper presents an approach to simulating random samples of an anomalous gravity field transformants (disturbing potential, gravity anomaly, deflections of the vertical, horizontal gradients of gravity). Two-dimensional trigonometric series are used as transformant models. The prerequisites for achieving the specified characteristics of spatial variability of samples and self-consistency are considered. An example of calculating transformant samples, as well as the adequacy of the spatial variability characteristics to the specified parameters, is given.

Keywords: Earth`s anomalous gravity field simulation, self-consistent model, transformants, disturbing potential, gravity anomaly, deflections of the vertical, horizontal gradients of gravity.

Введение

В настоящее время возрастает интерес к корреляционно-экстремальным навигационным системам, в которых карты или модели трансформант аномального гравитационного поля Земли (АГПЗ) рассматриваются в качестве корректоров местоположения объектов [1-6]. Известно, что точность определения местоположения при этом определяется, в основном, пространственной изменчивостью поля, точностью бортовых измерителей и соответствующих карт. Модели АГПЗ также широко используются и для оперативного определения гравиметрических параметров в целях начальной настройки систем управления летательных аппаратов.

Для оценки качества решения задач разработке средств и методов навигации и определения геодезических данных используются различные подходы, в число которых входит метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). Его использование в этом случае предусматривает моделирование трансформант поля (аномалии силы тяжести (АСТ), уклонений отвесной линии (УОЛ), вторых производных возмущающего потенциала (ВП)). Согласно методу Монте-Карло необходимо некоторое число реа-

лизаций трансформант, причем все реализации должны иметь заданные характеристики пространственной изменчивости – среднеквадратичное отклонение (СКО) и радиус корреляции. Разные трансформанты АГПЗ, указанные выше, дополнительно должны иметь соответствующие характеристики взаимной корреляции [7,8]. Это вытекает из объективной физической взаимосвязи различных трансформант АГПЗ [9].

Реализации отдельных трансформант АГПЗ как случайных полей двух координат часто получают с помощью формирующих фильтров [3-7,10]. Однако примеры использования подобных двумерных фильтров для получения реализаций разных трансформант АГПЗ с заданными характеристиками взаимной корреляции авторам не встречались. Кроме этого, при синтезе формирующих фильтров используется предположение о дробно-рациональном виде соответствующей спектральной плотности, что несколько ограничивает выбор модели случайного поля.

В статье предложено решение задачи синтеза модели АГПЗ в виде набора случайных реализаций самосогласованных трансформант с требуемыми характеристиками пространственной изменчивости на заданном локальном участке местности. Приведен числовой пример формирования на локальном участке местности реализаций трансформант АГПЗ с заданными характеристиками и оценки соответствия фактических характеристик реализаций заданным. Обоснована возможность повышения точности существующих карт УОЛ с использованием дополнительных измерений АСТ в отдельных точках локального участка местности.

Постановка задачи синтеза моделей трансформант аномального гравитационного поля Земли с учетом условия его потенциальности

Предположим, что моделируемое АГПЗ является однородным и изотропным. В качестве исходной модели используем ковариационную функцию (КФ) возмущающего потенциала АГПЗ. Ее вид и значения параметров должны удовлетворять известным ограничениям [7]. В задачах статистической обработки гравиметрической информации часто используются КФ Джордана [8] 3-го порядка, если АГПЗ характеризуется высокой пространственной изменчивостью в локальной области, или модель 4-го порядка – при описании более «спокойных» полей [11]. Для простоты используем КФ модели Джордана (аналогичные соотношения для модели 4-го порядка приведены в [12]), которую запишем в виде:

$$K_T(\Delta x, \Delta y) = \frac{3}{2}\sigma_g^2 d^2 e^{-\rho}\left(1 + \rho + \frac{\rho^2}{3}\right), \qquad (1)$$

где σ_g и d – заданные среднеквадратичное отклонение и параметр корреляции случайного поля АСТ;

$\rho = \frac{1}{d}\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ – нормированное расстояние между двумя произвольными точками, разности координат которых Δx и Δy.

Задача состоит в том, чтобы на плоской поверхности сформировать случайные реализации трансформант АГПЗ как функции северной x и восточной y координат в локальной области $x_S \le x \le x_N$, $y_W \le y \le y_E$. В состав трансформант входят: АСТ g, УОЛ в плоскостях меридиана ξ и первого вертикала η, горизонтальные градиенты g_x, g_y АСТ по осям x и y. При этом КФ и взаимно-ковариационные функции (ВКФ) реализаций всех трансформант должны быть самосогласованными и удовлетворять исходной формуле (1).

Обосновать выбор значений параметров σ_g и d в (1) на практике непросто. Их оценки могут быть найдены, например, по измерительным данным АСТ, а также с учетом известной связи между КФ и ВКФ различных трансформант в самосогласованных моделях АГПЗ [11]. Размеры локальной области (x_S, x_N, y_W, y_E) ограничены возможностями моделирования АГПЗ с требуемой точностью на плоскости, а не сфере.

Формирование случайных реализаций трансформант АГПЗ на основе двумерных тригонометрических рядов

Моделями самосогласованных трансформант АГПЗ являются двумерные тригонометрические ряды, в которых n и m – максимальные номера гармоник по осям x и y, соответственно. Это обосновано тем, что гармонические функции являются решениями уравнения Лапласа для потенциала объемных масс [9]. Указанные ряды позволяют рассчитывать значение любой трансформанты по координатам x_k, y_k произвольной k-й точки внутри локальной области. Задав такие точки на некоторой траектории или в узлах сетки, можно легко формировать требуемые одномерные или двумерные случайные реализации.

Аргументы $X_{i,j}^k, Y_{i,j}^k$ функций двумерного тригонометрического ряда рассчитываются по координатам x_k, y_k произвольно заданной точки, номерам гармоник $0 \le i \le n$, $0 \le j \le m$ и также учитывают масштабирование моделируемой локальной области (x_S, x_N, y_W, y_E) по области существования системы ортогональных функций $[-\pi, \pi]$.

Множители при тригонометрических функциях (амплитуды гармоник) являются случайными величинами. Их получают путем умножения взаимно независимых нормально распределенных псевдослучайных чисел $r^c_{i,j}, r^s_{i,j}, r^{cs}_{i,j}$ на соответствующие коэффициенты трансформант. Эти коэффициенты $C^g_{i,j}, C^\xi_{i,j} \ldots C^{gy}_{i,j}$ находятся посредством канонического разложения КФ трансформант (АСТ g, УОЛ ξ… горизонтального градиента АСТ g_y) в двумерные ряды Фурье. При предположениях, что моделируемое АГПЗ является однородным и изотропным, используется преобразование Ганкеля, позволяющее заметно упростить нахождение коэффициентов трансформант [13].

Важно заметить, что набор псевдослучайных чисел $r^c_{i,j}, r^s_{i,j}, r^{cs}_{i,j}$ един для всех случайных реализаций трансформант. Это является необходимым условием достижения самосогласованности трансформант АГПЗ. Требуемые характеристики пространственной изменчивости всех реализаций обеспечиваются коэффициентами $C^g_{i,j}, C^\xi_{i,j} \ldots C^{gy}_{i,j}$, которые определяются согласно исходной КФ (1). Схема вычисления значений трансформант в произвольной k-й точке приведена на *рисунок 1*. Для указанных выше моделей АГПЗ КФ и ВКФ трансформант можно найти в [11]. Соответствующие им формулы, с помощью которых находятся коэффициенты $C^g_{i,j}, C^\xi_{i,j} \ldots C^{gy}_{i,j}$ для КФ (1), имеют вид:

$$\left.\begin{aligned}
&\left(C^T_{i,j}\right)^2 = \iint K_T(x,y)\cos\left(X_{i,j}\right)\cos\left(Y_{i,j}\right)dxdy = \\
&= 2\pi\int_0 K_T(\rho)\rho J_0(\Omega\rho)d\rho = \frac{3}{2}\sigma_T^2 d^2 \frac{10\pi d^2}{\left[1+d^2\Omega^2\right]^{7/2}}, \\
&C^g_{i,j} = C^T_{i,j}\Omega, \\
&C^\xi_{i,j} = \frac{1}{\gamma}C^T_{i,j} i\omega_x,\ C^\eta_{i,j} = \frac{1}{\gamma}C^T_{i,j} j\omega_y, \\
&C^{gx}_{i,j} = C^T_{i,j}\Omega i\omega_x,\ C^{gy}_{i,j} = C^T_{i,j}\Omega j\omega_y.
\end{aligned}\right\}, \quad (2)$$

где пределы в интегралах предполагаются бесконечными;

$\Omega^2 = (i\omega_x)^2 + (j\omega_y)^2$, ω_x и ω_y – частоты, значения которых соответствуют границам x_S, x_N, y_W, y_E локальной области;

J_0 – функция Бесселя первого рода нулевого порядка;

γ – нормальное значение ускорения силы тяжести.

Аналогичные расчетные формулы для модели АГПЗ 4-го порядка приведены в развернутом виде в [12]. В общем случае легко записать формулы, аналогичные (2), представляющие собой линейные комбинации соответствующих формул моделей 3 и 4-го порядков. Это позволяет получить «плавный» переход от модели АГПЗ высокой пространственной изменчивости к модели «спокойного» поля в заданной локальной области.

Необходимое число членов n и m отрезка ряда Фурье может быть определено на основе равенства:

$$\varepsilon_T = 1 - \frac{1}{\sigma_T^2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\left(C^T_{i,j}\right)^2, \quad (3)$$

где ε_T - относительные потери в точности моделирования возмущающего потенциала АГПЗ. Аналогичные показатели точности легко определить и для рассматриваемых трансформант. Формула (3) также позволяет частично скомпенсировать потери в точности в случае заданных n и m путем нормирования значений $C^g_{i,j}, C^\xi_{i,j} \ldots C^{gy}_{i,j}$, например, с помощью следующей замены:

$$C^g_{i,j} \leftarrow C^g_{i,j} \Big/ \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\left(C^g_{i,j}\right)^2.$$

Формируемые таким образом случайные реализации трансформант АГПЗ являются самосогласованными имеют среднеквадратичные отклонения, ковариации и пространственные радиусы корреляции в соответствии с заданными видом и параметрами исходной КФ (1).

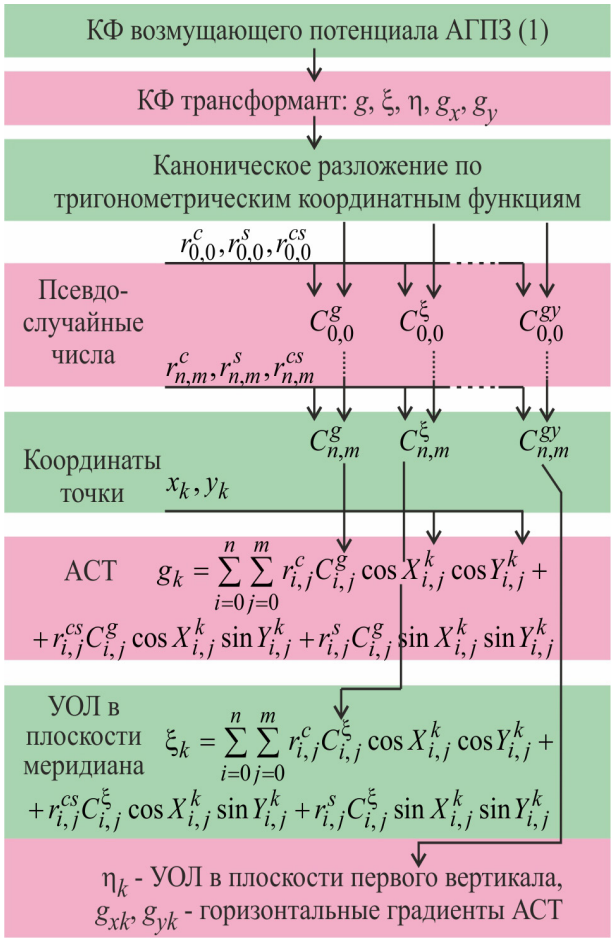


Рис. 1. Схема вычисления значений трансформант АГПЗ в произвольно заданной точке

Пример формирования имитационных моделей трансформант АГПЗ и оценка соответствия их характеристик заданным

Расчетные примеры моделирования случайных самосогласованных реализаций некоторых трансформант АГПЗ приведены на *рисунках 2-4*. Размеры локальной области составляют 100×100 км. Изоаномалы проведены через 2 мГал, 1“ и через 0,2 Э, соответственно.

Пространственный радиус корреляции случайного поля АСТ принят равным 8 км [9], среднеквадратичное отклонение – 20 мГал. При шаге сетки 500 м и числе гармоник тригонометрического ряда $n=m=100$ определяемая формулой (3)степень соответствия моделирования любой трансформанты не хуже 99,5% для исходной КФ (1). При других исходных данных реализации трансформант могут быть получены с помощью доступной программы [12].

Соответствие статистических характеристик случайных реализаций заданным и свойство самосогласованности подтверждают графики КФ (*рисунок 5*) и ВКФ (*рисунок 6*). Утолщенные линии рассчитаны для аналитических КФ и ВКФ, тонкие линии – для случайных реализаций соответствующих трансформант (АСТ, УОЛ в плоскости меридиана и производная АСТ по оси *x*). Графики случайных реализаций получены путем осреднения КФ и ВКФ, построенных для 402 прямолинейных сечений, проходящих через все узлы сетки параллельно осям *x* и *y*. На всех рисунках прослеживаются также выполнение соотношений между дисперсиями [11], присущих самосогласованным моделям АГПЗ.

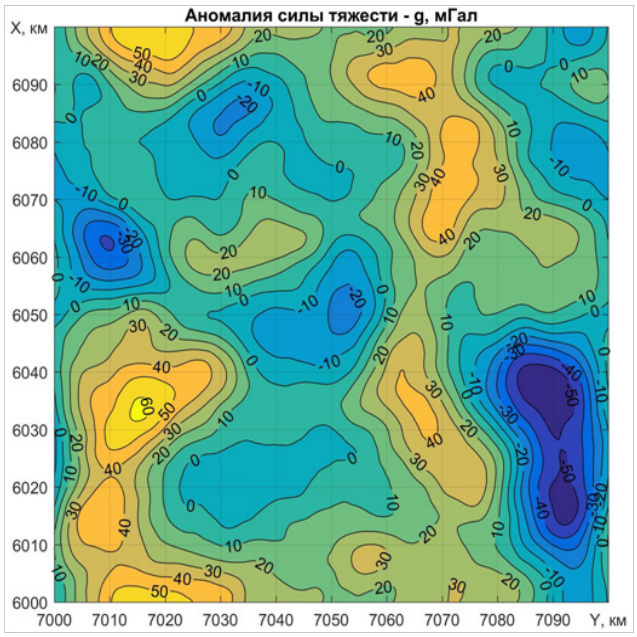


Рис. 2. Пример случайной реализации модели АСТ

Оценка достижимой точности определения АСТ и УОЛ на основе самосогласованной модели АГПЗ

При решении задач определения гравиметрических параметров в целях начальной настройки систем управления летательных аппаратов наибольший интерес вызывает решение задачи совместного определения АСТ и составляющих УОЛ. Ниже представлены результаты численной оценки СКО УСТ и УОЛ в произвольной точке. Уровни СКО рассчитаны для заданной СКО карты АСТ (1 мГал = 10^{-5} м/с^2), и

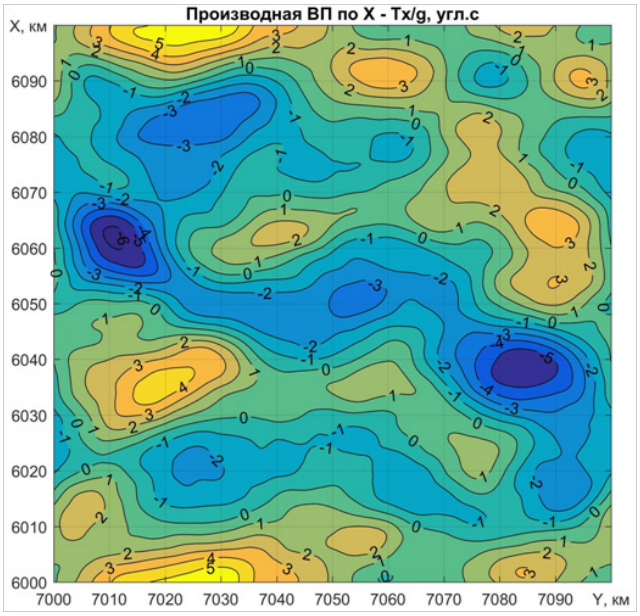


Рис. 3. Пример случайной реализации УОЛ в плоскости меридиана

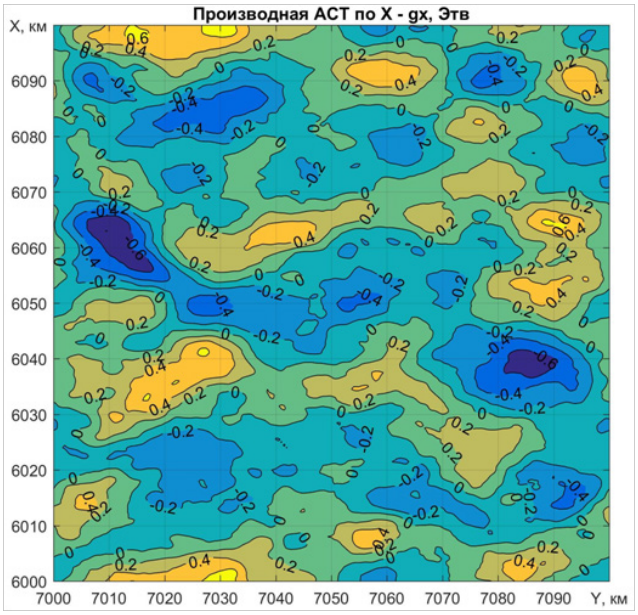


Рис. 4. Пример случайной реализации составляющей gx горизонтального градиента АСТ

СКО измерений АСТ (0,1 мГал) и УОЛ, соответственно, 0,2» и 0,1». Положение произвольной точки задается на одной координатной оси *X*, поэтому построены одномерные графики СКО АСТ и УОЛ. Точка *X*=0, в которой выполнены дополнительные измерения, отмечена звездочкой. Непосредственно на графиках приведены основные числовые значения, использованные в расчетах. В расчетах погрешности АСТ и УОЛ являются параметрами самосогласованной модели АГПЗ.

На *рисунке 7* показан случай, в котором дополнительно измерена только АСТ, при этом радиус корреляции погрешностей карты АСТ $R_{КОР}$ = 30 км (под радиусом корреляции $R_{КОР}$ понимается значение аргумента корреляционной функции при уменьшении ее значения в *e* раз). Из рисунка видно, что СКО АСТ «в среднем» составит 0,5 мГал. УОЛ также уточняется, в среднем на 10% в области ± $2R_{КОР}$. Изменение радиуса корреляции $R_{КОР}$ не приводит к изменению формы графиков, при этом все зависимости «масштабируются» по оси *X*.

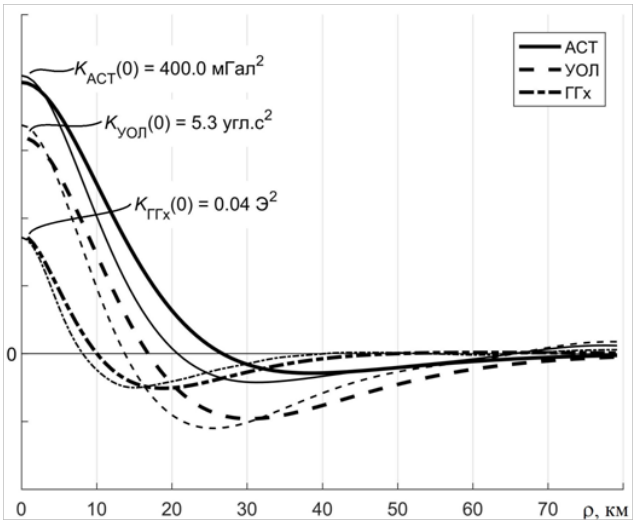


Рис. 5. Графики КФ АСТ, УОЛ в плоскости меридиана и производная АСТ по оси x

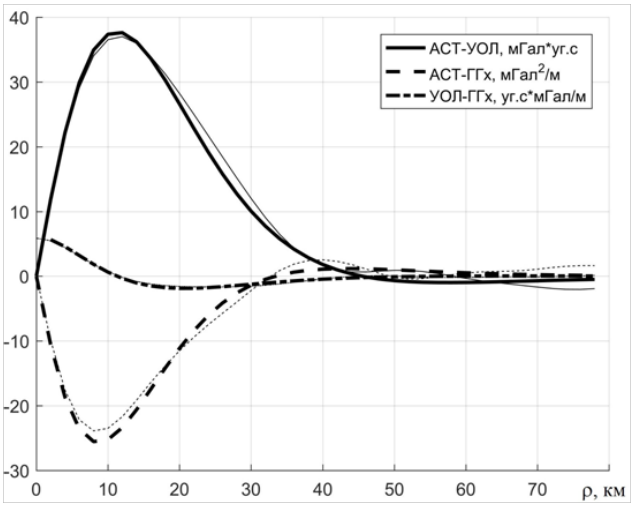


Рис. 6. Графики ВКФ: АСТ и УОЛ в плоскости меридиана, АСТ и ее производная по оси x, УОЛ в плоскости меридиана и производная АСТ по оси x

Оценка точности в случае, когда дополнительно измерены одновременно АСТ и УОЛ подтверждает известное соотношение между СКО соответствующих гравиметрических параметров:

$$\sigma_\eta = \sigma_\xi = \frac{\sigma_g}{g\sqrt{2}}.$$

При значении СКО АСТ σ_g=1,0 мГал имеем СКО УОЛ $\sigma_\eta=\sigma_\xi\approx 0{,}15$».

Это позволяет обосновать возможность и эффективность кратного повышения точности заблаговременного определения УОЛ путем выполнений серий измерений АТС в локальных районах. Число пунктов, в которых должны быть дополнительные измерения, определяется радиусом корреляции погрешностей АСТ (например, если локальный район 300×300 км и $R_{КОР}$ = 30 км, то требуемое число пунктов 10×10=100). Зависимость объемов работ от радиуса корреляции погрешностей АГПЗ определяет необходимость нахождения соответствующих оценок на основе натурных измерительных данных.

Заключение

Рассмотрен подход, позволяющий формировать случайные реализации трансформант аномального гравитационного поля (возмущающего потенциала, аномалии силы тяжести, уклонений отвесной линии, горизонтальных градиентов силы тяжести) в заданной локальной области на горизонтальной плоскости.

Получаемые реализации не являются ста-

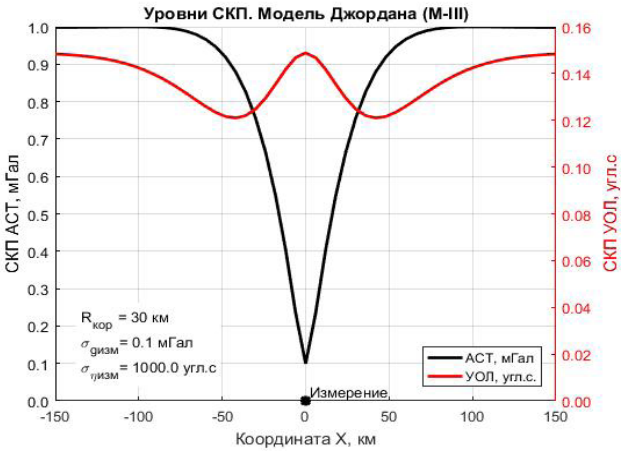


Рис. 7. Зависимости СКО АСТ и УОЛ от расстояния до точки, в которой дополнительное измерение АСТ

тистически взаимно независимыми случайными полями плоских координат. Напротив, они считаются самосогласованными, поскольку одновременно все удовлетворяют уравнению Лапласа для потенциала объемных масс.

Требуемые характеристики пространственной изменчивости трансформант достигаются путем задания вида и параметров ковариационной функции возмущающего потенциала поля (среднеквадратичного отклонения и радиуса корреляции) или однозначно связанных с ней ковариационных функций трансформант.

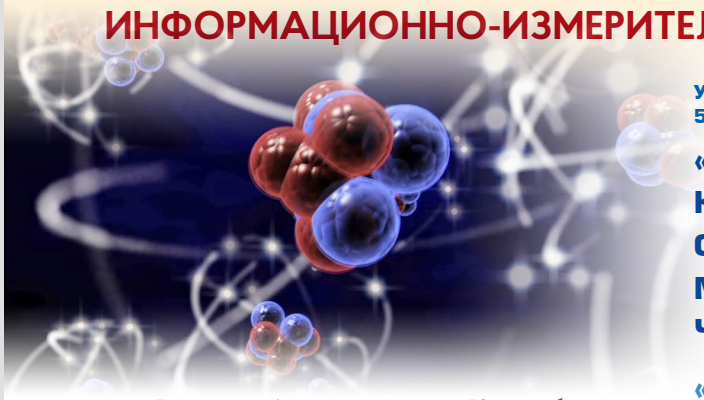
В основу решения задачи положено каноническое разложение ковариационных функций возмущающего потенциала и трансформант по тригонометрическим функциям двух аргументов, соответствующим плоским координатам в локальной области.

Соответствие модельных характеристик пространственной изменчивости поля заданным проиллюстрировано примером расчета случайных реализаций на плоскости и построения функций ковариации для разных самосогласованных трансформант.

На основе учета взаимной согласованности УОЛ и АСТ обоснована возможность повышения точности существующих гравиметрических карт с использованием дополнительных измерений АСТ в отдельных точках.

Литература

1. Степанов О.А., Носов А.С., Торопов А.Б. О классификации алгоритмов решения задачи навигации по геофизическим полям // XXVII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов. СПб: изд-во ЦНИИ Электроприбор, 2020. С.326-336.
2. Каршаков Е.В., Павлов Б.В., Тхоренко М.Ю., Папуша И.А. Перспективные системы навигации летательных аппаратов по физическим полям: градиент стационарного магнитного поля, градиент гравитационного поля, переменное магнитное поле // XXVII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов. СПб: изд-во ЦНИИ Электроприбор, 2020. С. 316-325.
3. Навигация по гравитационному и магнитному полям Земли. Новые технологии. Тезисы докладов II научно-технической конференции. Менделеево, Московская обл., 29-31 октября 2019 г. 144 с.
4. Степанов О.А., Торопов А.Б. Методы нелинейной фильтрации в задаче навигации по геофизическим полям. Ч.1. Обзор алгоритмов // Гироскопия и навигация, 2015. №3. С.102-125; Ч.2. Современные тенденции развития // Гироскопия и навигация, 2015. №4. С. 147-159.
5. Шолохов А.В., Беркович С.Б., Котов Н.И. Формирование реализаций самосогласованных трансформант аномального гравитационного поля в локальных областях // XXVIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов. СПб: изд-во ЦНИИ Электроприбор, 2021. – в печати.
6. Джанджгава Г.И., Августов Л.И. Навигация по геополям: научно-методические материалы в помощь разработчикам систем автономной навигации с использованием данных о геофизических полях. М.: Научтехлитиздат, 2018. 293 с.
7. Дмитриев, С.П. Высокоточная морская навигация. СПб.: Судостроение, 1991. 220 с.
8. Jordan S.K. Self-consistent statistical models for gravity anomaly and undulation of the geoid, Journal of Geophysical Research, 1972, vol. 77, №. 20, pp. 2156-2202.
9. Гофман-Велленгоф Б., Мориц Г. Физическая геодезия: Пер. с англ. Ю.М. Неймана, Л.С. Сугаиповой / Под редакцией Ю.М. Неймана. М.: Изд-во МИИГАиК, 2007. 426 с.
10. Müller S. Schüler L. GSTools: Reverberating Red. Zenodo, 2019. URL: https://zenodo.org/record/3468230#.YG8eXB8zaUk (дата обращения: 08.04.2021).
11. Левицкая З.Н. Статистические модели аномальных характеристик гравитационного поля Земли. Гравиметрические исследования на море, 1988. С. 26-47.
12. Программа для ЭВМ 2019615528 Российская Федерация. Программа по формированию реализаций самосогласованных составляющих аномального гравитационного поля Земли / Шолохов А.В., Белоножко М.Г.; приор. 22.04.19; патентообладатель ФГКВОУ ВО ВА РВСН им. Петра Великого МО РФ; опубл. 26.04.19, Бюл. № 5. URL: https://github.com/SholokhovAV/RandomGravitySampler (дата обращения: 12.12.2021).
13. Прудников А.П. Интегралы и ряды. В 3-х т. Т.2 Специальные функции. 2-е изд., исправ. М.: Физматлит, 2003. 664 с.



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

«БИФУРКАЦИЯ КВАТЕРНИОНА» КАК ПУТЬ К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ ОПИСАНИЮ РАСЩЕПЛЕНИЯ МАТЕРИИ НА МАССИВНЫЕ ЧАСТИЦЫ И БЕЗМАССОВЫЕ ПОЛЯ

«QUATERNION BIFURCATION» AS A WAY TO A MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE SPLITTING OF MATTER INTO MASSIVE PARTICLES AND MASSLESS FIELDS

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

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

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

Аннотация
В работе на основании введенного дуального кватерниона показано наличие у легких субатомных частиц тенденции к квантованию кубического корня из их энергии покоя. Высказано предположение, что безмассовые поля и массивные частицы являются физическим отражением своеобразной бифуркации, возникшей в процессе переопределения математики кватернионов.
Ключевые слова: кватернионы, дуальный кватернион, элементарные частицы, квантование, бифуркация, энергия покоя.

Summary
Based on the introduced dual quaternion, the paper shows that light subatomic particles have a tendency to quantize the cube root of their rest energy. It is suggested that massless fields and massive particles are a physical reflection of a kind of bifurcation that arose in the process of redefining the mathematics of quaternions.
Keywords: quaternions, dual quaternion, elementary particles, quantization, bifurcation, rest energy.

В трудах Аристотеля метафизика – это разделы, идущие за описанием физики, а наш современник Макс Борн определил метафизику уже в форме попытки постичь мир как целое посредством мысли [1]. Мысль лежит на грани идеального, а математика – лучший способ навигации в нем. Развитие математики сопровождалось скачкообразным усложнением природы используемых в ней чисел. В древности хватало натуральных чисел, а к середине XIX в. стало мало даже комплексных чисел $A+i\cdot B$ с их мнимой единицей i, и тогда Гамильтоном [2] был выполнен следующий скачок: он обнаружил кватернионы – гиперкомплексные числа

$$Q = A+i\cdot B+j\cdot C+k\cdot D,$$

содержащие три мнимые единицы i, j и k. Кватернионы не получили в описании природы предполагавшегося широкого применения: попытки обнаружить в математике кватернионов специфику, конкурентно выигрышную для ее применения в физике [3], оказались недостаточно убедительными.

Однако, в процедуре определения кватернионов осталась не исследованной многообещающая альтернатива. Обратив внимание на то, что поколение более сложных чисел конструируется из чисел предыдущего поколения, Гамильтон мог бы конструировать кватернионы, не наращивая количество осей:

$$A+i\cdot B=>A+i\cdot B+j\cdot C=>A+i\cdot B+j\cdot C+k\cdot D,$$

а используя комплексные числа с ортогональными мнимыми единицами. Для кватернионов

их надо три штуки: $a+i\cdot b$, $c+j\cdot d$ и $e+k\cdot f$. Ортогональность мнимых единиц становится востребованной лишь при их перемножении. Перемножение трех комплексных чисел приводит к «пред-кватерниону»

$$S=(a+i\cdot b)(c+j\cdot d)(e+k\cdot f),$$

где i, j и k – тройка мнимых единиц, а числа a, b, c, d, e и f – шестерка реальных параметров. В S мнимые единицы равноправны, как и в 4-параметрическом кватернионе Q, но для превращения S в Q нужно еще решить задачу избавления от двух лишних параметров. Оказывается, что существует два решения, даже косвенно не ущемляющих равноправия мнимых единиц. Достаточно убрать эту пару параметров либо в вещественных частях комплексных чисел:

$$Q1=(a+i\cdot b)(a+j\cdot c)(a+k\cdot d),$$

либо в мнимых:

$$Q2=(a+i\cdot b)(c+j\cdot b)(d+k\cdot b),$$

т.е. определение Q через промежуточный этап S порождает сразу пару различных кватернионов $Q1$ и $Q2$.

Каждый сорт числа – натуральные, целые, рациональные и т.д. – имеет свой спектр приложений. Натуральные числа исчисляют «штуки» (монеты, звезды и пр.), рациональные числа исчисляют отношения (отношение частот в музыке, отношение количества зубьев у связанных шестеренок в механизмах и пр.), без комплексных чисел нелегко обойтись, например, в электротехнике и в квантовой механике. У двойни кватернионов $Q1$ и $Q2$ тоже должен быть спектр соответствующих приложений. Одно из таких приложений обнаруживается в физике частиц и полей.

Выражение

$$E^2=(mc^2)^2+(\boldsymbol{p}c)^2=(mc^2)^2+p_x^2c^2+p_y^2c^2+p_z^2c^2$$

для квадрата энергии в теории относительности можно формально переписать в виде произведения двух сопряженных кватернионов:

$$E^2=(mc^2+i\cdot p_xc+j\cdot p_yc+k\cdot p_zc)(mc^2-i\cdot p_xc-j\cdot p_yc-$$
$$-k\cdot p_zc)\equiv E_Q\cdot E_{Q^*}.$$

Когда величины E_Q и E_{Q^*} проецируются на ось реальных чисел, двойне кватернионов

$$Q1=(a+i\cdot b)(a+j\cdot c)(a+k\cdot d)$$

и

$$Q2=(a+i\cdot b)(c+j\cdot b)(d+k\cdot b)$$

соответствуют два квадрата энергии:

$$E^2_{Q1}=(a^3-bcd)(a^3+bcd)$$

и

$$E^2_{Q2}=(acd-b^3)(acd+b^3).$$

Произведения bcd и acd тоже обнуляются из-за появления в них нулевых сомножителей как следствие знака минус в равенстве двух квадратов при, соответственно, $a\neq0$ и $b\neq0$), и остается, во-первых, $E_{Q1}^2=a^6$ как квадрат реальной энергии покоя $E_{Q1}=a^3$ и, во-вторых, $E_{Q2}^2=-(b^3)^2$ как квадрат мнимой компоненты энергии $E_{Q2}=ib^3$. Реальной компоненты энергии и, соответственно, массы покоя во втором случае нет. Вводя в явном виде сомножитель E_0 как носитель размерности энергии и, соответственно, переопределяя параметр a как безразмерную величину, можно представить множество реальных энергий покоя в виде составного спектра состояний $E_{Q1}=E_0a^3$ и $E_{Q2}=0$. Если энергию $E_{Q2}=0$ интерпретировать как нулевую энергию покоя безмассового поля, то энергию $E_{Q1}=E_0a^3$ естественно представлять, как энергию покоя массивной субатомной частицы.

Гипотезу о возможности применения дубля кватернионов для исчисления безмассовых полей и массивных частиц несложно подтвердить. На примере субатомных частиц мы уже иллюстрировали эмпирическую находку [4], что кубические корни из энергий покоя m_xc^2 (здесь: из энергий E_{Q1} и E_{Q2}), лишенных размерности путем деления на энергию покоя m_ec^2 электрона e (здесь: на E_0), тяготеют к $a=n$ и $a=n\pm1/2$, где n – натуральные числа или ноль. Действительно, числа $(m_x/m_e)^{1/3}$, т.е. кубические корни из чисел m_x/m_e в заметной доле случаев приблизительно квантованы (см. *таблицу 1*). Среднее отклонение чисел $(m_x/m_e)^{1/3}$ от ближайших чисел n и $n\pm1/2$ близко к нулю (см. 4-й столбец *таблицы 1*). Иными словами, для широкого диапазона легких субатомных частиц числа $(m_x/m_e)^{1/3}$ тяготеют к значениям n и $n\pm1/2$, что крайне нетривиально.

Представленный ниже модифицированный метод Монте-Карло оценки доверительной вероятности β приводит к оценке $\beta>0{,}95$ наличия феномена квантования величин $(m_x/m_e)^{1/3}$. В процессе этой оценки использована замена набора экспериментальных масс m_x [5] множественными наборами случайных чисел – аналогов числовых значений масс, выраженных в единицах Мэв/c^2. Использовались два варианта оценки. В первом варианте, были опущены случаи фотона, трех нейтрино и электрона, поскольку учет этой пятерки особенных масс тривиально доводит оценку доверительной вероятности β по всем строкам Таблицы до значений, близких к единице. Случаи протона и нейтрона тоже были опущены, но уже по прямо противоположной причине. Это очевидное, и по-видимому, многозначительное исключение: соответствующие значения $(m_x/m_e)^{1/3}$, т.е. 12,245304708(39)≈12,**25** и 12,250928512(39)≈12,**25** расположены точно в середине между ближайшими числами 12,**00 и** 12,**50**. При этом варианте оценки β мы выбирали случайные числа из диапазона, сопровождающего рост объема экспериментального материала,

Таблица 1

Тенденция к квантованию значений $(m_x/m_e)^{1/3}$ легких субатомных частиц x

Легкая частица x	Масса m_x (Мэв/c2)	$(m_x/m_e)^{1/3}$	Округленное число $(m_x/m_e)^{1/3}$ и отклонение	Рост β по мере увеличения диапазона масс m_x с купюрами и без них	
γ	0	0	0.**00** (0.00)	-	1.0000
ν_e	≈0	≈0	0.**00** (+ 0.00)	-	1.0000
ν_μ	≈0	≈0	0.**00** (+ 0.00)	-	1.0000
ν_τ	≈0	≈0	0.**00** (+ 0.00)	-	1.0000
e	*0.5109989461(16)*	*1*	*1.00* (*0.00*)	-	1.0000
μ	105.6583745(24)	5.**91**3273597(51)	6.**00** (– 0.09)	0.63	0.9999
π^0	134.9768(5)	6.**41**6235(8)	6.**50** (– 0.08)	0.81	0.9998
$\pi^\pm$	139.57039(18)	6.**48**8203(3)	6.**50** (– 0.01)	0.94	0.9998
$K^\pm$	493.677(16)	9.**88**570(11)	10.**00** (– 0.11)	0.93	0.9998
K^0	497.611(13)	9.**91**189(9)	10.**00** (– 0.09)	0.95	0.9998
η^0	547.862(17)	10.**23**490(11)	10.**00** (+ *0.23*)	0.74	0.9933
$\rho(770)$	775.26(25)	11.**49**06(12)	11.**50** (– 0.01)	0.85	0.9977
$\omega(782)$	782.65(12)	11.**52**64(6)	11.**50** (+ 0.03)	0.92	0.9994
$K^*(892)^\pm$	891.66(26)	12.**03**91(12)	12.**00** (+ 0.04)	0.95	0.9994
$K^*(892)^0$	895.55(20)	12.**05**66(9)	12.**00** (+ 0.06)	0.97	0.9999
p	*938.272081(6)*	12.245304708(39)	*12.25* (– 0.00)	-	0.9960
n	*939.565413(6)*	12.250928512(39)	*12.25* (+ 0.00)	-	0.9730
$\eta'(958)$	957.78(6)	12.**32**96(3)	12.**50** (*– 0.17*)	***0.95***	***0.9526***
$\varphi(1020)$	1019.461(16)	12.**58**878(7)	12.**50** (+ 0.09)	***0.96***	***0.9583***

по которому производилась оценка. Диапазон случайных чисел равномерно рос от 80÷130 Мэв/c^2 до 80÷1050 Мэв/c^2 по мере увеличения количества строк таблицы.

В последней колонке таблицы представлен второй вариант оценки β, уже в отсутствие каких-либо купюр. По мере увеличения количества строк Таблицы случайные числа в этом варианте оценки выбирали из сопровождающего диапазона, первоначально расположенного от нуля до пары Мэв/c^2 и далее квадратично расширяющего вплоть до финальной области, простирающейся от нуля до 1050 Мэв/c^2. Значения оценки β, итоговые для исследованного достаточно широкого интервала легких частиц, в обоих вариантах превысили уровень 0,95.

Таким образом:

1) введенное выше определение дуального кватерниона оправдывает факт наличия у легких субатомных частиц тенденции к квантованию кубического корня из энергий покоя;

2) безмассовые поля и массивные частицы – это физическое отражение своеобразной бифуркации, возникшей в процессе переопределения математики кватернионов.

На основании дополнительных исследований [6] мы предполагаем, что в рассмотренном частном приложении двойни кватернионов $Q1$ и $Q2$ физический смысл реальных величин $(m_x/m_e)^{1/3}$, а также частный физический смысл комплексных чисел

$$a+i\cdot b,\ c+j\cdot d \text{ и } e+k\cdot f$$

может оказаться близким к физическому смыслу амплитуд вероятности в квантовой механике.

Литература

1. Уфимцев Р. Хвост ящерки. Метафизика метафоры. См., например, https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=sites&srcid=ZGVmYXVsdGRvbWFpbnxncmFmaWthc3R1ZGVudGFtfGd4OjZhYmM2N2ZhODcwN2QwN2Y
2. Hamilton W.R. Lectures on Quaternions (Hodges & Smith, Dublin), 1853.
3. Березин А.В., Курочкин Ю.А., Толкачев Е.А. Кватернионы в релятивистской физике. М.: УРСС, 2003.
4. Коломбет В.А. Макроскопические флуктуации, массы элементарных частиц и дискретное пространство-время // Биофизика, 1992.№37. С.492.
5. Zyla P.A. et al. (Particle Data Group), 2020. Prog. Theor. Exp. Phys.
6. Коломбет В.А. Феноменология субатомных частиц и фундаментальных взаимодействий при взгляде из области низких энергий. В сб.: Система «Планета Земля»: 75 лет Победы в Великой Отечественной войне 1941-1945 гг. М.: ЛЕНАРД, 2020. С.183-203.

УДК 629.0645

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ДИЗЕЛЬ–ГЕНЕРАТОРОВ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННОЙ НАГРУЗКИ

IMPROVING THE EFFICIENCY OF PARALLEL OPERATION OF DIESEL GENERATORS UNDER VARIABLE LOAD CONDITIONS

Борис Александрович Усик
кандидат технических наук, доцент
доцент кафедры
филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел.: 8 (4967) 72-19-11
E-mail: usik.b@yandex.ru

Андрей Владимирович Лучин
кандидат технических наук, доцент
заместитель начальника кафедры
филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)
E-mail: luchin_svi@mail.ru

Игорь Анатольевич Обыночный
кандидат педагогических наук
заместитель начальника факультета
филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)
E-mail: igorobynochnyy@mail.ru

Аннотация
В статье показан подход по организации электроснабжения объектов с помощью автономных дизель-генераторов, за счет организации их параллельной работы. Предлагается определять оптимальное количество дизель-генераторов необходимых для покрытия текущей нагрузки, при этом все кроме одного дизель-генератора будут работать в номинальном режиме, а последний может использоваться при переменной скорости вращения.
Ключевые слова: дизель-генератор, параллельная работа, распределение нагрузки.

Summary
The article shows an approach to organizing the power supply of objects using autonomous diesel generators, by organizing their parallel operation. It is proposed to determine the optimal number of diesel generators needed to cover the current load, while all but one diesel generator will operate in nominal mode, and the latter can be used at variable speed.
Keywords: diesel generator, parallel operation, load distribution.

Для электроснабжения объектов различного назначения применяются дизельные электростанции (ДЭС), которые могут использоваться как в качестве основных, так и в качестве резервных источников электроэнергии. Обычно в состав ДЭС входит 2-3 дизель-генератора (ДГ), которые могут включаться на параллельную работу. В отдельных случаях для электроснабжения энергоемких объектов могут применяться несколько ДЭС, которые, как, правило, используются по отдельности, но их также можно объединить и использовать для электроснабжения общей нагрузки. При этом такое объединение будем называть единой электростанцией. При таком подходе число ДГ электростанции, включаемых на параллельную работу, увеличивается и возникает задача организации их оптимальной работы.

Работа дизельных двигателей считается оптимальной, когда в них происходит полное сгорание топлива, что достигается при работе двигателя с номинальной нагрузкой [1]. Для дизеля, работающего в составе ДГ, это означает, что активная мощность, вырабатываемая генератором, должна быть равна номинальной мощности.

Номинальная мощность $P_{ном}$ отдельного ДГ выбирается такой, чтобы быть достаточной для обеспечения минимальной нагрузки. При минимальной нагрузке в работе может находиться только один ДГ, а для компенсации нагрузки, превышающей номинальную мощность отдельного ДГ, параллельно ему подключается один или несколько дополнительных ДГ.

Назовем сумму номинальных мощностей, включенных в параллель ДГ установленной мощностью электростанции $P_{уст}$. При включении нескольких ДГ в работу установленная мощность электростанции может увеличиться в гораздо большей степени, чем это требуется

для компенсации фактической потребляемой мощности, так как нагрузка может изменяться сравнительно плавно (в небольших пределах), а установленная мощность изменяется дискретно, кратно номинальной мощности включаемых в работу ДГ. При равномерном распределении нагрузки между ДГ, которое осуществляется в современных ДЭС [2], каждый из этих дизель-генераторов загрузится мощностью ниже номинальной. Работа дизельных двигателях на нагрузках ниже номинальных приводит к неполному сгоранию в них топлива, а это, в свою очередь, вызывает образование повышенного нагара на стенках камеры сгорания, снижает надежность работы и ресурс двигателя.

Предлагается подход, позволяющий оптимизировать работу ДГ. Суть подхода заключается в том, что нагрузка между включенными на параллельную работу ДГ распределяется не равномерно, а таким образом, что все ДГ, кроме одного загружаются номинальной мощностью, а один принимает на себя мощность, достаточную для полной компенсации потребляемой мощности.

При таком распределении мощности между n работающими ДГ достигается баланс мощностей, определяемый выражением

$$P_{потр} = (n-1)\cdot P_{ном} + P_{доб} \quad (1),$$

где $P_{потр}$ – потребляемая мощность;
$P_{ном}$ – номинальная мощность отдельного ДГ;
$P_{доб}$ – добавочная мощность, недостающая, для полной компенсации потребляемой мощности.

Число ДГ, предусматривающих работу с номинальным значением мощности, определяется, как целое от деления величины фактической потребляемой мощности $P_{потр}$ на величину номинальной мощности отдельного дизель-генератора $P_{ном}$

$$n-1 = [P_{потр}/P_{ном}] \quad (2)$$

а величина добавочной мощности $P_{доб}$ определяется, как разность между установленной мощностью электростанции и потребляемой мощностью.

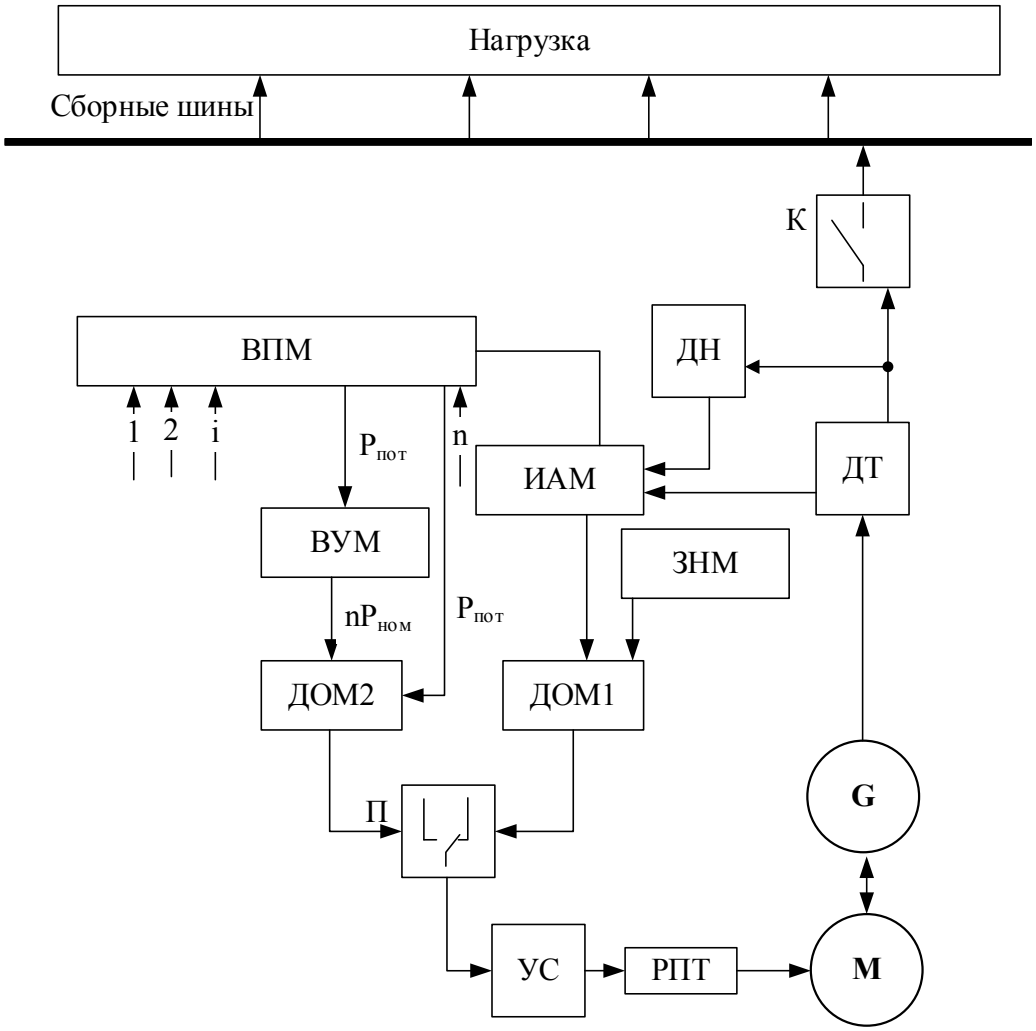


Рис.1. Система управления мощностью отдельного дизель-генератора

$$P_{доб} = P_{уст} - P_{потр} \quad (3)$$

где установленная мощность электростанции определяется выражением

$$P_{уст} = (n-1) \cdot P_{ном} \quad (4)$$

Очевидно, что величины $(n-1)$ и $P_{доб}$ могут быть определены, если известно значение потребляемой мощности $P_{потр}$. Поэтому при формировании команды на первоначальный запуск ДГ используется значение потребляемой мощности на момент отключения внешней сети. В дальнейшем, необходимое для работы, число ДГ определяется в зависимости текущего значения потребляемой мощности.

Следует отметить, что практическая реализация рассмотренного способа требует решения ряда проблем:

1) Необходимо установить правило, по которому определяется какие из ДГ выбрать для работы в режиме номинальной мощности, а какой для работы в режиме добавочной мощности. Выбор должен осуществляться с учетом равномерности наработки.

2) Должны быть определены способы регулирования мощности дизель-генераторов.

3) Должны быть также выработаны решения, обеспечивающие практически мгновенный перевод любого ДГ из режима работы с номинальной мощностью в режим работы с добавочной мощностью.

При решении *первой проблемы* в качестве приоритета была выбрана наименьшая наработка ДГ. В соответствии с этим, после каждого включения ДГ в работу и последующей их остановки должно производиться ранжирование ДГ, соответствующему их наработке.

На *рисунке 1* представлена система управления мощностью отдельного ДГ, поясняющая правило, положенное в основу оптимального распределения нагрузки дизель-генераторами.

На *рисунке 1* обозначены:

G – источник электроэнергии (синхронный генератор);

М – дизельный двигатель;

К – контактор генератора;

ВПМ – вычислитель потребляемой мощности;

ДН, ДТ – датчики напряжения и тока, соответственно;

ИАМ – измеритель активной мощности;

ВУМ – вычислитель установленной мощности;

ЗНМ – задатчик номинальной мощности;

ДОМ1, ДОМ2 – первый и второй, соответственно, датчики отклонения мощности;

П – переключатель;

УС – усилитель сигнала;

РПТ – регулятор подачи топлива.

Схема может работать в двух режимах: регулирования мощности основного ДГ или регулирование мощности добавочного ДГ. Для перевода схемы в тот или иной режим работы используется переключатель П. Перевод схемы в режим основного агрегата осуществляется установкой переключателя в правое положение. При этом ко входу усилителя УС подключается первый датчик отклонения мощности ДОМ1 на выходе которого формируется сигнал, пропорциональный отклонению мощности, развиваемой данным ДГ, от номинальной мощности. Соответствующие сигналы подаются на входы ДОМ1 с измерителя активной мощности ИАМ и задатчика номинальной мощности ЗНМ. Усиленный сигнал подается на вход регулятора подачи топлива РПТ, устанавливающего такую подачу топлива в двигатель М, при которой ДГ загружается номинальной мощностью.

При установке переключателя П в левое положение к усилителю УС подключается второй датчик отклонения мощности ДОМ2, на выходе которого формируется сигнал, пропорциональный отклонению потребляемой мощности от установленной. Соответствующие сигналы подаются на входы ДОМ2 с вычислителя потребляемой мощности ВПМ и с вычислителя установленной мощности ВУМ. Усиленный сигнал подается на вход РПТ, который устанавливает такую подачу топлива данного ДГ, при которой развиваемая им мощность равна добавочной мощности. У

Установка рассмотренной системы на каждом ДГ позволит осуществить оптимальное распределение нагрузки между параллельно включенными ДГ независимо от их количества. Управление электростанцией осуществляется следующим образом.

Определение ДГ, которые будут запущены первоначально при отключении внешней сети определяется на основании значения мощности, которая потреблялась от электростанции на момент восстановления внешней сети, при котором все ДГ останавливаются, а также по результатам ранжирования, проведенном после их остановки.

При отключении внешней сети эти ДГ включаются в работу и начинается контроль текущего значения потребляемой мощности, на основании которого принимается решение о запуске дополнительных или останове «лишних» ДГ. Причем для исключения запуска или останова ДГ при кратковременных набросах или сбросах нагрузки формирование команд осуществляется с выдержкой времени.

Практическая реализация рассмотренного

подхода не требует больших материальных затрат, так как нет необходимости внесения конструктивных изменений, в применяемые в настоящее время ДЭС и их системы.

В то же время применение такой системы требует наличия распределительного устройства для подключения нескольких ДГ, а система управления должна быть дополнена микропроцессорным устройством и связями, позволяющими реализовывать рассмотренные выше алгоритмы управления.

Оптимизация параллельной работы нескольких дизель-генераторов, входящих в единую электростанцию на основе предложенных решений позволит:

1) Повысить надежность электроснабжения.

2) Сократить расход топлива при работе электростанции на заданную нагрузку и тем самым увеличить длительность ее автономной работы при отсутствии внешней сети.

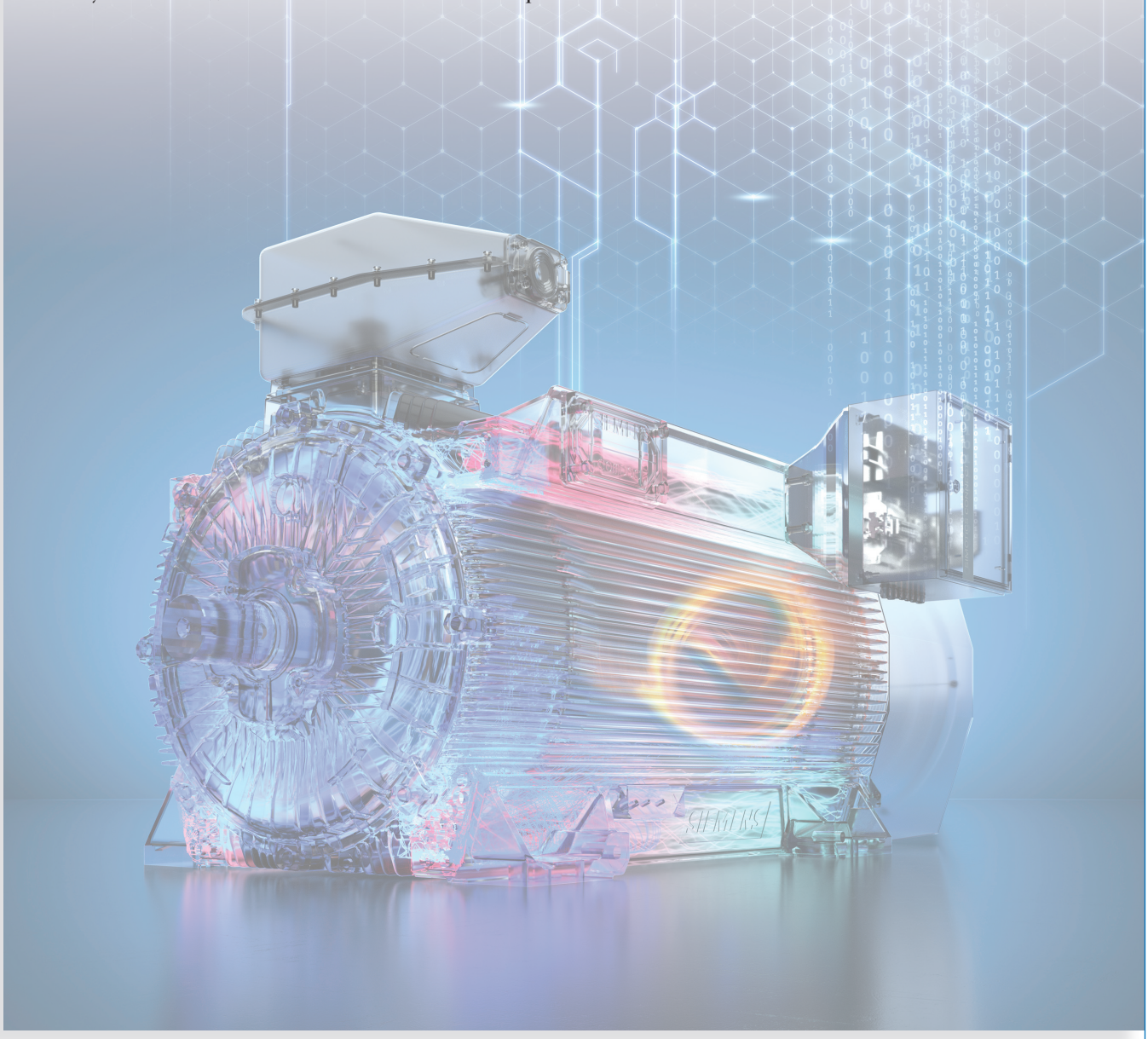
3) Уменьшить расход ресурса при работе дизель-генераторов за установленное время и уменьшить их простои из-за необходимости проведения технического обслуживания.

Дальнейшие исследования нужно направить на разработку методов оценки технического состояния ДГ, результаты которого должны быть использованы при ранжировании ДГ.

Литература

1. Михайлов В.А. Автоматизированные электроэнергетические системы судов. Л.: Судостроение, 1977, 512 с.

2. Автоматика энергосистем: учебное пособие / Составители Ю.С. Боровиков, А.С. Гусев, М.В. Андреев, А.О. Сулайманов. Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2015. 196 с.



УДК 629.78

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ ЗВЕЗД ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫМИ ПРИБОРАМИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

SOFTWARE PACKAGE FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF STARS BY OPTOELECTRONIC DEVICES OF SPACE VEHICLES

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

Дмитрий Вячеславович Смирнов
почетный работник науки и техники РФ
доктор технических наук, доцент
действительный член АИН
профессор кафедры ФГБОУ ВО МАИ (НИУ)
Первый Вице-президент Института – заместитель Председателя Правления Института МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7 (4967) 35-31-93
E-mail: dv_smr@iifmail.ru

Рафаэль Рамисович Казаков
кандидат технических наук
доцент кафедры «Бортовых информационных и измерительных комплексов космических аппаратов» ВКА имени А.Ф. Можайского
Адрес: 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13
Тел.: +7 (911) 223-59-67
E-mail: xoxlov1984@bk.ru

Тимур Нариманович Альдебергенов
инженер отделения «Эксплуатации телескопа и системы наведения» отдела «Квантово-оптических систем» в/ч 85906

Аннотация
Рассмотрены основные особенности применения космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. Предложен подход к моделированию оптико-электронных приборов космических аппаратов. Представлен программный комплекс по определению параметров звезд и проанализированы возможности его применения.
Ключевые слова: космический аппарат, дистанционное зондирование Земли, околоземное космическое пространство, оптико-электронные приборы, параметры звезд.

Summary
The main features of the use of spacecraft for remote sensing of the Earth are considered. An approach to modeling the optical-electronic devices of spacecraft is proposed. A software package for determining the parameters of stars is presented and the possibilities of its application are analyzed.
Keywords: spacecraft, remote sensing of the Earth, near-earth space, optoelectronic devices, parameters of stars.

Введение

Курс, взятый США на милитаризацию космоса, объективно лежит в русле концепции единоличного лидерства США и полностью отвечает их национальным интересам. Более того, он позволяет наполнить эту концепцию реальным и грозным содержанием. С созданием ударных космических систем США планируют обрести новое качество во взаимоотношениях с другими странами. Они надеются получить возможность закрепления своего лидерства в одной из ключевых сфер – космосе не только за счет более высоких технологических достижений и размаха космических программ, но и, при необходимости, за счет применения или угрозы применения космического оружия.

Для достойного противостояния вероятному противнику России необходимо иметь требуемое количество космических аппаратов (КА) способных решать задачи по предназначению в условиях военной опасности и без нее. Развертывание и наращивание таких орбитальных группировок продолжается ежегодно, однако ввиду финансовых и политических ограничений, запуски КА в последние годы сильно усложняется.

Для решения такого рода задач, наиболее подходящими являются космические аппараты (КА) дистанционного зондирования земли (ДЗЗ).

Они могут использоваться в качестве спутников двойного назначения и имеют на борту специальные оптико-электронные приборы (ОЭП), совершенствование которых является важной и актуальной научной задачей [1]. Модернизация ОЭП осуществляется за счет повышения чувствительности, либо – совершенствования программного обеспечения ориентации и навигации КА, поэтому разработка программного комплекса по определению параметров звезд ОЭП КА является актуальной и современной задачей.

Особенности использования КА ДЗЗ в современных условиях

На КА ДЗЗ в последнее время возлагают большие надежды, связанные с решением исследовательских задач [2], а также задач по обеспечению обороноспособности России в околоземном космическом пространстве (ОКП). Исследовательские задачи можно разделить на следующие:

- исследование, сбор и обработка информации о состоянии элементов суши, океанов;
- определение местонахождения, физических свойств и геометрических особенностей исследуемых объектов;
- исследование состояния атмосферы Земли;
- мониторинг сельского хозяйства;
- исследование причин возникновения и прогнозирование чрезвычайных ситуаций, связанных с техногенными и природными воздействиями.

Задачи по обеспечению безопасности РФ:

- разведка объектов земной поверхности;
- разведка объектов в ОКП;
- селекция космических объектов.

Таким образом, можно сделать вывод, что специальная бортовая аппаратура КА ДЗЗ, позволяет использовать их в качестве КА двойного назначения:

- в мирное время – выполнять задачи по исследованию определенной области земной поверхности;
- в военное время – решать задачи разведки.

Применение таких КА повышает оперативность восполнения существующих и формирования дополнительных орбитальных группировок при возникновении военной угрозы и переводе ВС РФ в высшие степени боевой готовности [2,3].

Все множество ОЭП, выполняющих в том числе функции ориентации и навигации КА, можно разделить на четыре основные группы, представленные на *рисунке 1*.

Совокупность трех типов автоматических приборов – солнечных датчиков, построителей местной вертикали и звездных датчиков – обеспечивает решение всех задач ориентации КА на околоземной орбите [1, 3] от исходного положения до постоянного поддержания с заданной точностью режимов инерциальной или орбитальной ориентации.

Моделирование работы ОЭП КА ДЗЗ

В качестве исходных данных использовались следующие параметры, представленные в *таблице 1*.

Внешний вид основного меню программного комплекса представлен на *рисунке 2*.

При разработке модели использовались следующие математические зависимости:

1) Определение эффективной температуры звезды определяется по формуле:

$$T = 4600\left(\frac{1}{0{,}92(B-V)+1{,}7}+\frac{1}{0{,}92(B-V)+0{,}62}\right)$$

где T – температура звезды, К;

B–V – показатель цвета звезды (из каталога Hipparcos).

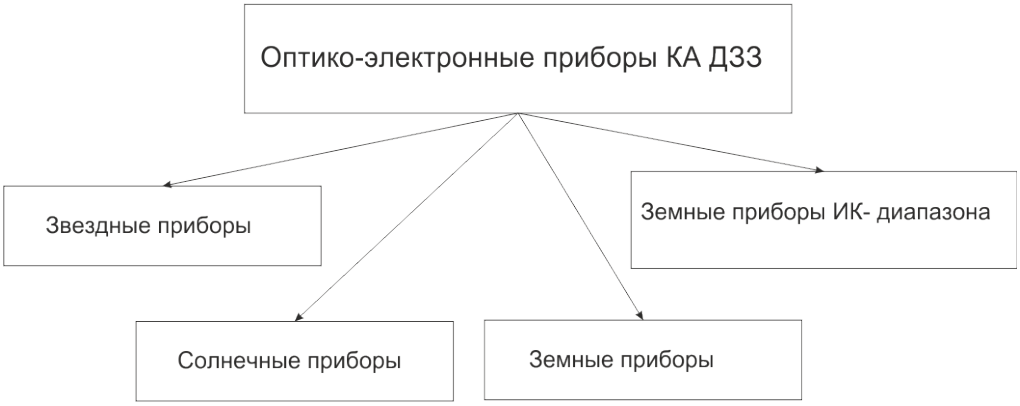


Рис. 1. Основные группы приборов ориентации и навигации КА

2) Расчет спектрального потока излучения звезды на границе земной атмосферы осуществляется по формуле Планка для абсолютного черного тела [3]:

$$E_{\pi}(\lambda,T)=\frac{2\pi hc^2}{\lambda^5}\cdot\frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right)}$$

где $E_{\pi}(\lambda, T)$ – поток излучения абсолютно черного тела, Вт*м*нм;
h – постоянная Планка, Дж*с;
k – постоянная Больцмана, Дж/К;
c – скорость света в вакууме, м/с;
λ – длина волны, нм.

3) Светимость звезды определяется по выражению

$$L=E\cdot 4\pi\cdot R^2$$

где E – освещенность, Люксы;
R – расстояние от Земли до звезды, Парсек.

4) Температура звезды определяется в соответствии с выражением

$$T=\frac{1}{\left(\frac{L}{4\cdot\pi\cdot R^2\cdot\sigma}\right)^4}$$

где L – светимость звезды, Ватт;
R – расстояние от Земли до звезды, Парсек;
σ – Постоянная Стефана-Больцмана

$$\left(5{,}67\cdot 10^{-8}\cdot \text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-4}\right).$$

Разработанный программный комплекс позволяет:

- определить светимость звезды;
- определить температуру звезды;
- определить эффективную температуру звезды;
- определить спектральный поток излучения;
- рассчитать относительные спектральные характеристики звезд4
- построить зависимости потока излучения для объекта со звездными величинами от 12 до 15 m;
- построить зависимости относительных спектральных характеристик звезд различных спектральных классов.

Результаты вычисления интегрального потока фотонов (E0(λ, T)) от звезды нулевой величины в зависимости от показателя цвета представлены на *рисунке 3*.

На графике обозначена зависимость от показателя цвета для звезд нулевой звездной величины на границе земной атмосферы в интервале длин волн от 200 до 1100 нм.

Реальные относительные спектральные характеристики звезд различных спектральных классов, показаны на *рисунке 4*.

Таблица 1

№ п/п	Наименование параметра	Номинальные значения параметров для выбранного варианта АД
	Диаметр входного зрачка, $D_{вх.зр.}$	32
	Фокусное расстояние объектива, f	55 ± 0,23
	Коэффициент максимального пропускания оптики, τ_{max}	0,75
	Диаметр кружка рассеяния, $D_{кр.рас.}$	50 мкм
	Число фоточувствительных элементов ФППЗ, $N_x x N_y$	2048x1024
	Размер фоточувствительного элемента ФППЗ, $d_x x d_y$	(12x12) мкм
	Диапазон звездных величин, m_a	-1,5…+6,0
	Время накопления, $t_{нак}$	0,19 с
	Число кадров накопления, по которому осуществляется обнаружение и измерение координат	1

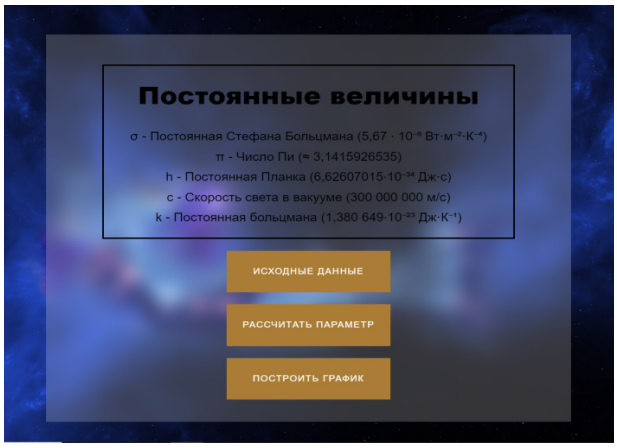


Рис. 2. Внешний вид основного меню программного комплекса

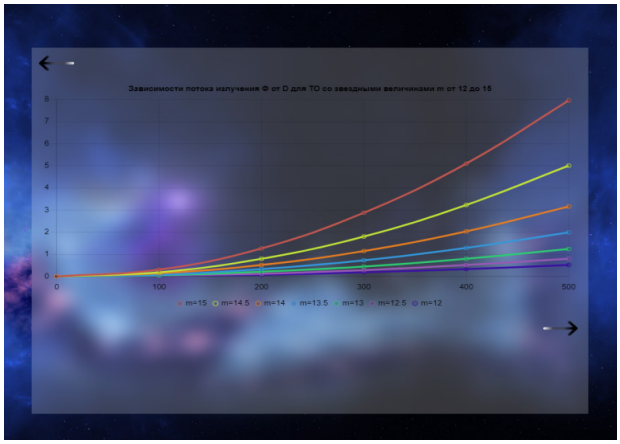


Рис. 3. График зависимости потока излучения для объекта со звездными величинами от 12 до 15 m

Кривые приведены для звезд различных спектральных классов. Значения показателя цвета *B–V* соответствуют каталогу. Из рисунков видно, что спектры звезд соответствуют модели излучения абсолютно черного тела.

Моделирование не учитывает специфические индивидуальные особенности излучения звезд, такие как линии поглощения или эмиссии.

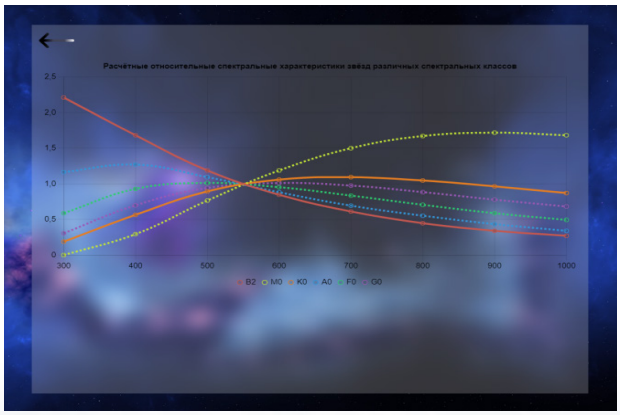


Рис. 4. График зависимости относительных спектральных характеристик звезд различных спектральных классов

Заключение

Разработанный программный комплекс позволяет определять некоторые параметры звезд, а также рассчитывать требуемые зависимости, моделируя работу ОЭП КА ДЗЗ. Удобные интерфейс и структура программного продукта позволяют использовать его в учебном процессе по различным дисциплинам, а также при исследовании существующих и разработке перспективных ОЭП КА ДЗЗ.

Литература

1. Лучко С.В. Информационные оптико-электронные средства космических аппаратов: учебное пособие / С.В. Лучко, И.А. Трофимов, А.А. Ядренкин. СПб.:, 2015. 51 с.
2. Сутырина Е.Н. Дистанционное зондирование Земли: учебное пособие. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013 165 с.
3. Казаков Р.Р. Прикладная оптика [Электронный ресурс]: учебное пособие / Р.Р. Казаков, Д.Л. Колыгин, И.А. Трофимов. Электрон. текстовые дан. (34.3 Мб). СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2021. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

УДК 621.398.8

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОКАНАЛОВ МЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ПРИ НИЗКО ПОДНЯТЫХ АНТЕННАХ

EVALUATION OF ENERGY AND STATISTICAL CHARACTERISTICS OF METER-RANGE RADIO CHANNELS WITH LOW-RAISED ANTENNAS

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

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

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

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

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

Аннотация
В статье решена задача оценки энергетических и статистических характеристик радиоканалов метрового диапазона при низко поднятых антеннах в дифракционной зоне. Установлено, что в зоне дифракции волны методы поэлементного приема сигналов не могут обеспечить заданную достоверность приема сигнала в целом, для которого представлены требуемые энергетические характеристики.
Ключевые слова: напряженность поля, множитель ослабления, отношение сигнал/шум, зона дифракции, поэлементный прием, прием в целом, вероятность битовой ошибки.

Summary
The article solves the problem of assessing energy and statistical characteristics of VHF radio channels with low-raised antennas in the diffraction zone. It has been established that in the wave diffraction zone, the methods of element-by-element reception of signals cannot provide a given reliability of signal reception as a whole, for which the required energy characteristics are presented.
Keywords: field strength, attenuation multiplier, signal-to-noise ratio, diffraction zone, element-wise reception, reception in general, the probability of a bit error.

Важнейшей особенностью радиоканалов метрового диапазона подвижных радиостанций является то, что высота поднятия передающих и приемных антенн над поверхностью земли сравнима с длиной радиоволны. Это ограничивает дальность радиосвязи и не позволяет обеспечить требуемую напряженность электрического поля в дифракционной зоне (зоне тени) [1].

Постановка задачи.

Известны механизмы распространения радиоволн метрового диапазона, параметры радиоканала: высоты поднятия антенн над земной поверхностью; мощность радиопередатчика и коэффициент усиления передающей антенны; рабочая длина волны; требуемая полоса пропускания радиоканала; параметры земной поверхности (подстилающей поверхности).

Требуется определить: напряженность электрического поля в точке приема; отношение сигнал/шум в точке приема и достоверность принятых данных; фазочастотные свойства радиолинии.

Известно, что для учета влияния кривизны Земли на процессы распространения радиоволн при низко поднятых передающей и приемной антеннах принято разбивать трассу радиолинии на три участка: зону освещенности, зону полутени и зону тени (*рисунок 1*) [1].

На *рисунке 1* обозначены:

h_1 – высота поднятия передающей антенны WA_1 над поверхностью земли, *м*;

h_2 – высота поднятия приемной антенны WA_2 над поверхностью земли, *м*;

$h_1^{'}$ – приведенная высота антенны WA_1, равная

$$h_1^{'} = h_1 - \frac{r^2}{2r_{экв}}\left(\frac{h_1}{h_1+h_2}\right)^2; \qquad (1)$$

$$r_0 = (3{,}57...4{,}12)\left(h_1^{0,5} + h_2^{0,5}\right), км$$

$$r_{экв} = 8{,}5\cdot 10^6\, м;$$

$h_2^{'}$ – приведенная высота антенны WA_2, равная

$$h_2^{'} = h_2 - \frac{r^2}{2r_{экв}}\left(\frac{h_2}{h_1+h_2}\right)^2.$$

В первом приближении принято считать, что границы зоны полутени удалены от передающей антенны на расстояния $0{,}8r_0$ и $1{,}2r_0$.

В зоне освещенности (дальность радиосвязи $r \le 0{,}8r_0$) для расчета напряженности электрического поля в точке приема применяют квадратичную формулу Б.А.Введенского [1]

$$E_g = \frac{\sqrt{30PG}}{r^2}\frac{4\pi h_1^{'} h_2^{'}}{\lambda}, \qquad (2)$$

где P – мощность радиопередатчика;

G – коэффициент усиления передающей антенны;

λ – длина волны;

r – требуемая дальность радиосвязи, *м*.

Сложнее дело обстоит в зонах полутени и тени, где для определения E_g используют различные методы [1]. Однако суть этих методов сводится к определению множителя ослабления $K(x)$, который зависит от параметров подстилающей поверхности: относительной диэлектрической проницаемости (ξ_r) и удельной проводимости (σ, *См/м*).

Однако величины ξ_r и σ не дают полной характеристики условий распространения радиоволны в земле и вдоль ее поверхности. Среды разделяют на диэлектрики и проводники не по значениям ξ_r и σ, а по соотношению плотностей токов смещения $I_{см}$ и проводимости $I_{пр}$.

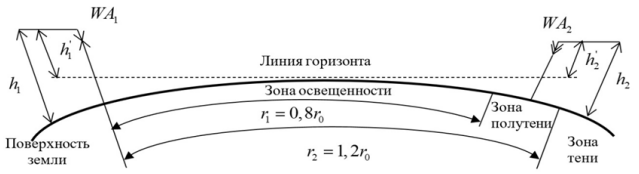


Рис. 1. Зоны распространения радиоволн

Поэтому электрические свойства земной поверхности будем оценивать относительной комплексной диэлектрической проницаемостью, которая при гармоническом сигнале возбуждения антенны равна

$$\dot{\xi}_r = \xi_r - j60\lambda\sigma.$$

При оценке E_g для радиоволн, распространяющихся вдоль границы воздух–почва, решающее значение имеет абсолютная величина относительной комплексной диэлектрической проницаемости почвы, равная

$$\left|\dot{\xi}_r\right| = \left[\xi_r^2 + (60\lambda\sigma)^2\right]^{0,5}.$$

Решение задачи для действующего значения напряженности поля представим в виде

$$E_g = E_0\dot{K}(x),$$

где E_0 – действующее значение напряженности электрического поля Земли при $\sigma = \infty$;

$\dot{K}(x)$ – комплексная функция, которая представляет модуль множителя ослабления, оценивающий, во сколько раз напряженность электрического поля над реальной Землей меньше напряженности поля над идеально проводящей плоскостью при прочих равных условиях:

$$\dot{K}(x) = 1 - \frac{2\sqrt{x}}{e^x}\int_0^{\sqrt{x}} e^{y^2}dy - j\frac{\sqrt{\pi x}}{e^x},$$

где $x = \dfrac{\pi r}{\lambda\left|\dot{\xi}_r\right|}$.

Модуль $\left|\dot{K}(x)\right| = \sqrt{\left(1 - \frac{2\sqrt{x}}{e^x}\int_0^{\sqrt{x}} e^{y^2}dy\right)^2 + \frac{\pi x}{e^{2x}}},$

фазовый угол вектора $\left|\dot{K}(x)\right|$, определяющий фазочастотную характеристику радиолинии, равен

$$\varphi\left[\dot{K}(x)\right] = arctg\left(-\frac{\frac{\sqrt{\pi x}}{e^x}}{1 - \frac{2\sqrt{x}}{e^x}\int_0^{\sqrt{x}} e^{y^2}dy}\right). \qquad (3)$$

Выражение для определения действующего значения напряженности электрического поля

Таблица 1

Изменение $\left|\dot{K}(x)\right| = f(\lambda)$ при ξ_r=5, σ=7*10^{-3} *См/м*

Дальность *r*, *км*	Длина волны *λ*, *м*	$\left\|\dot{K}(x)\right\|$
30	1	2,664·10^{-5}
	5	1,441·10^{-4}
	10	3,478·10^{-4}
	20	1,048·10^{-3}
25	1	3,107·10^{-5}
	5	1,73·10^{-4}
	10	4,146·10^{-4}
	20	1,261·10^{-3}
20	1	3,997·10^{-5}
	5	2,164·10^{-4}
	10	5,226·10^{-4}
	20	1,583·10^{-3}

в зоне дифракции радиоволны (в зоне тени $r>0,8r_0$) будет следующим

$$E_g=\frac{(60PG)^{0,5}}{r}\left|\dot{K}(x)\right|. \qquad (4)$$

В *таблице 1* представлены численные значения $\left|\dot{K}(x)\right|$ для $\xi_r=5$, $\sigma=7*10^{-3}$ *См/м* и различных длинах волн λ на дальностях $r=20$, 25 и 30 *км*.

Анализ *таблицы 1* показывает:

- увеличение длины волны способствует увеличению множителя ослабления, например, при $r=30$ *км* для $\lambda=1$ *м* значение $\left|\dot{K}(x)\right|=2,664\cdot10^{-5}$, а для $\lambda=10$ *м* значение $\left|\dot{K}(x)\right|=3,478\cdot10^{-4}$, что приведет к пропорциональному увеличению E_g (более чем на один десятичный порядок);
- при $\lambda=const$ с увеличением дальности связи r множитель ослабления $\left|\dot{K}(x)\right|$ уменьшается, т.е. будет соответственно уменьшаться и значение E_g, например, при $\lambda=5м=const$ увеличение r с 20 *км* до 30 *км* приведет к уменьшению E_g на коэффициент равный

$$\frac{2,164\cdot10^{-4}}{1,441\cdot10^{-4}}\cdot\frac{30}{20}\simeq2,25.$$

Зададимся параметрами радиолинии $h_1=h_2=7м$; $P=1000$ *Вт*; $G=4$; $r=15км$; $\lambda=5м$ и оценим значение E_g в освещенной зоне. Для этого определим $r_0=3,57(\sqrt{7}+\sqrt{7})=18,891$ *км*.

Так как $r<r_0$, то для оценки E_g будем использовать выражение (2). Предварительно определим значения h_1' и h_2'

$$h_1'=h_2'=7-\frac{(15\cdot10^3)^2}{8,5\cdot10^6}\frac{1}{8}=3,69м,$$

$$E_g=\frac{\sqrt{30\cdot1000\cdot4}}{(15\cdot10^3)^2}\frac{4\cdot3,14\cdot(3,69)^2}{5}=6,41\cdot10^{-5}В/м.$$

Зная значение E_g, можно определить отношение сигнал/шум на входе первой решающей схемы радиоприемника

$$h_o^2=\frac{(E_gh_g)^2}{4(N_Ш-1)kT\Delta FR_{вх}},$$

где h_g – действующая высота приемной антенны (для несимметричного вертикального вибратора возьмем $h_g=0,5$ *м*);

$N_Ш$ – коэффициент собственного шума радиоприемника (примем $N_Ш=31$);

k – постоянная Больцмана, равная $k=1,38*10^{-23}$ *Дж/К*^{0};

T – рабочая температура радиоприемника (выберем $T=300^0$ *К*);

ΔF – эффективная полоса пропускания, которая определяется видом используемого сигнала (для телефонного режима работы возьмем $\Delta F=8$ *кГц*, для телеграфного (цифрового) режима примем $\Delta F=150$ *кГц*);

$R_{вх}$ – входное сопротивление радиоприемника (примем $R_{вх}=75$ *Ом*).

Тогда для телефонного режима работы приемника

$$h_{o(T)}^2=\frac{(6,41\cdot10^{-5}\cdot0,5)^2}{4\cdot30\cdot1,38\cdot10^{-23}\cdot300\cdot8\cdot10^3\cdot75}=356,$$

для телеграфного (цифрового) режима $h_{o(Ц)}^2=18,987$.

При уменьшении мощности P ($P=50$ *Вт*) значение $E_g=1,43*10^{-5}$ *В/м*,

$$h_{o(T)}^2=171,5; \qquad h_{o(Ц)}^2=9,147.$$

Полученные значения h_o^2 при $P=50$ *Вт* и $P=1000$ *Вт* позволяют обеспечить достаточную достоверность радиосвязи на дальности $r<r_0=18,89$ *км*.

Однако при увеличении требуемой дальности радиосвязи r (пусть $r=25км$) и сохранении тех же параметров радиолинии для обеспечения $E_g=6,41\cdot10^{-5}$ *В/м* необходимо увеличивать высоты поднятия антенн до $h_1=h_2=16$ *м*, что принципиально невозможно для подвижных радиостанций.

Исследуем значения E_g в зоне тени $r=25$ *км* для условий дифракции радиоволны. Используя выражение (4), получим

$$E_g=\frac{\sqrt{60\cdot1000\cdot4}}{25\cdot10^3}1,73\cdot10^{-4}=3,46\cdot10^{-6}В/м$$

для $P=1000Вт$; $\lambda=5м$; $\xi_r=5$; $\sigma=7\cdot10^{-3}$ *См/м*;

$$E_g=\frac{\sqrt{60\cdot50\cdot4}}{25\cdot10^3}1,73\cdot10^{-4}=7,74\cdot10^{-7}\ В/м$$

для $P=50Вт$; $\lambda=5м$; $\xi_r=5$; $\sigma=7\cdot10^{-3}$ *См/м*.

Тогда

$$h_{o(T)}^2=\frac{(3,46\cdot10^{-6}\cdot0,5)^2}{4\cdot30\cdot1,38\cdot10^{-23}\cdot300\cdot8\cdot10^3\cdot75}=1$$

для $P=1000Вт$; $h_{o(T)}^2=0,5$; для $P=50$ *Вт*.

Очевидно, при уменьшении полосы пропускания ΔF (для канала тональной частоты $\Delta F=3,1$ *кГц*) и коэффициента шума радиоприемника $N_Ш$ (возможно значение $N_Ш=5$) на дальности $r=25$ *км* может быть обеспечена достоверная радиосвязь даже при $P=50Вт$ ($h_{0(T)}^2\geq6$).

Для цифрового радиоканала ($\Delta F\geq64$ *кГц*) значение ($h_{0(T)}^2\geq6$) и в зоне тени достоверную радиосвязь методами поэлементного приема обеспечить невозможно.

Исследуем возможности метода приема сигналов в целом для решения такой задачи. Сущность метода приёма сигнала в целом состоит в использовании кодового уплотнения данных ортогональными кодовыми последовательностями Уолша-Адамара на передающей стороне радиоканала и возможности их однозначного разделения на приемной стороне [3]. Для метода приема сигнала в целом при воздействии узкополосной гармонической помехи вероятность битовой ошибки на выходе декодера цифрового радиоканала метрового диапазона ($\Delta F=64$ *кГц*, сигнал с относительной фазовой манипуляцией) определяется выражением

$$P_B = 0{,}5\left[1-\left(1-\frac{1}{\sqrt{\pi}}\int\limits_{\left(\frac{1}{8h^2_{o(Ц)}}+\frac{P_П}{BP_C}\right)^{-0,5}}^{\infty} e^{-t^2}dt\right)^8\right],$$

где $P_П/P_C$ – отношение мощности узкополосной гармонической помехи ($P_П$) к мощности полезного сигнала (P_C);

B – база сигнала, а коэффициент 8 определяет разрядность АЦП и длину кодовой последовательности Уолша-Адамара.

В *таблице 2* представлены оценки вероятности P_B в зависимости от отношения $h^2_{o(Ц)}$ для поэлементного приема и приема сигнала в целом при $P_П/P_C=0$ и $P_П/P_C=1$.

Анализ результатов, представленных в *таблице 2*, показывает:

- при $h^2_{o(Ц)} = const$ прием сигнала в целом позволяет получить значительно меньшую вероятность P_B (т.е., повысить помехоустойчивость или достоверность принятых данных);
- при наличии узкополосной гармонической помехи ($P_П/P_C=1$) поэлементный прием сигнала не позволяет получить вероятность $P_B \le 10^{-3}$, а прием сигнала в целом решает эту задачу ($P_B=2{,}63\cdot10^{-4}$ при $h^2_{o(Ц)} = 10{,}6$).

В статье исследована помехоустойчивость метода приема сигнала в целом при воздействии на вход радиоприемника прерывистой импульсной помехи с различной скважностью.

Выражение для средней вероятности битовой ошибки P_B (помехоустойчивости) получено в виде

$$P_B = 0{,}5\left[1-\left(1-\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int\limits_{\left(\frac{1}{8h^2_{o(Ц)}}+\frac{P_П}{2BSP_C}\right)^{-0,5}}^{\infty} e^{-t^2}dt\right)^8\right],$$

где S – скважность импульсной помехи, равная отношению ширины спектра помехи к ширине спектра сигнала.

В *таблице 3* представлена зависимости вероятности $P_B=f(S)$ при $h^2_{o(Ц)}=1; h^2 = 5$; $P_П/P_C=0{,}2$; $P_П/P_C=1$ для поэлементного приема и приема сигнала в целом.

Анализ результатов, представленных в *таблице 3*, позволяет сделать важные для практики выводы:

- существует значение скважности импульсной помехи S_0, при которой импульсная помеха наиболее опасна: при поэлементном приеме для $h^2_{o(Ц)}=1$, $P_П/P_C=0{,}2$ значение $S_0=1$, а для $h^2_{o(Ц)}=5$, $P_П/P_C=0{,}2$ значение $S_0=0{,}1722$; при приеме в целом для $h^2_{o(Ц)}=1$, $P_П/P_C=0{,}2$ значение $S_0=0{,}0113$, для $h^2_{o(Ц)}=1$, $P_П/P_C=1$ значение $S_0=0{,}0575$, а для $h^2_{o(Ц)}=5$, $P_П/P_C=1$ значение $S_0=0{,}04$;
- при скважности импульсной помехи $S=S_0$ значение вероятности $P_B>10^{-3}$ и возникает задача как компенсировать вредное действие импульсной помехи на полезный сигнал, так как

Таблица 2

Зависимость $P_B = f(h^2_{o(Ц)})$

$P_П/P_C$	Поэлементный прием						Прием в целом, $B=8$			
0	$h^2_{o(Ц)}$	1	4,14	6,27	8,43	10,6	1		1,5	2
	P_B	0,04	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	$1{,}22\cdot10^{-4}$		$1{,}93\cdot10^{-6}$	$2{,}97\cdot10^{-8}$
1	$h^2_{o(Ц)}$	1	6,27		10,6		1	3,0974	6,27	10,6
	P_B	0,079	0,0473		0,044		$9{,}1\cdot10^{-3}$	10^{-3}	$4{,}07\cdot10^{-4}$	$2{,}63\cdot10^{-4}$

Таблица 3

Зависимость $P_B=f(S)$ для поэлементного приема сигналов и приема в целом

Поэлементный прием сигнала	$h^2_{o(Ц)}=1$, $P_П/P_C=0{,}2$	S	0,00242	0,0113	0,04	0,1722	0,5	1
		P_B	0,0011	0,00365	0,00913	0,0224	0,0493	0,0887
	$h^2_{o(Ц)}=5$, $P_П/P_C=0{,}2$	S	0,00242	0,0113	0,04	0,1722	0,5	1
		P_B	0,0011	0,00363	0,00783	0,00943	0,00633	0,0049
Прием сигнала в целом	$h^2_{o(Ц)}=1$, $P_П/P_C=1$	S	0,01	0,0575	0,1	0,2	0,5	1
		P_B	0,0226	0,044	0,0396	0,075	0,00925	0,00435
	$h^2_{o(Ц)}=1$, $P_П/P_C=1$	S	0,004	0,0113	0,04	0,1722	0,608	1
		P_B	0,0069	0,0091	0,00516	0,001	0,00051	0,0005
	$h^2_{o(Ц)}=5$, $P_П/P_C=1$	S	0,004	0,0113	0,04	0,1722	0,608	1
		P_B	0,01	0,02	0,0215	0,01575	$1{,}73\cdot10^{-4}$	$6{,}98\cdot10^{-6}$

Таблица 4

Изменение $\varphi(K)$ в зависимости от λ

Дальность r, *км*	Длина волны λ, *м*				
	1	10	20	40	100
20	0	0	0	0	$6{,}385\cdot10^{-5}$
25	0	0	0	0	$2{,}235\cdot10^{-6}$

увеличение $h^2_{o(Ц)}$ заметного результата не дает (например, при приеме сигнала в целом для $P_П/P_С=1$ увеличение $h^2_{o(Ц)}$ в 5 раз привело к уменьшению вероятности $P_В$ всего лишь в 2 раза).

По выражению (3) оценим изменение фазы волны $\varphi(K)$, *рад* в зависимости от длины волны λ для различных r при тех же значениях $\xi_r=5$, $\sigma=7\cdot10^{-3}$ *См/м* (*таблица 4*).

Анализ *таблицы 4* позволяет сделать важный для практической связи вывод о том, что длина волны метрового и декаметрового диапазонов в зоне дифракции не влияет на фазочастотную характеристику радиолинии.

Заключение

1. При низко поднятых антеннах ($h_1\geq\lambda$, $h_2\geq\lambda$) на дальности радиосвязи $r\leq0{,}8r_0$ расчет энергетических характеристик радиолиний метрового диапазона (напряженность электрического поля в точке приема E_g, отношение сигнал/шум h^2_o на входе первой решающей схемы радиоприемника) целесообразно проводить по квадратичной формуле Б.А.Введенского. Полученные результаты расчетов не противоречат экспериментальным данным.

2. При $h_1\geq\lambda$, $h_2\geq\lambda$ на дальности радиосвязи $r>0{,}8r_0$ энергетические характеристики радиолиний метрового диапазона предложено проводить с использованием комплексного множителя ослабления $|\dot{K}(x)|$, который учитывает параметры подстилающей поверхности земли в зоне дифракции. При этом получены следующие новые результаты:

- длина волны оказывает существенное влияние на значение напряженности электрического поля в точке приема (более чем на один десятичный порядок);
- с увеличением дальности связи и протяженности зоны дифракции (зоны тени) напряженность поля уменьшается (при $\lambda=5$*м* и протяженности зоны дифракции 10 *км* значение E_g уменьшилось в 2,25 раза);
- в зоне дифракции при реально используемой мощности радиопередатчика $P=50$ *Вт*, можно получить отношение сигнал/шум $h^2_o\geq6$ только в пределах полосы пропускания канала тональной частоты ($\Delta F=3{,}1$ *кГц*);
- фазочастотная характеристика (ФЧХ) радиолинии метрового диапазона, в отличие от ФЧХ радиолинии гектометрового и километрового диапазона, линейная, т.е. фаза радиоволны не испытывает изменений на трассе распространения на различных частотах.

3. В зоне дифракции целесообразно переходить от поэлементного приема сигнала к приему в целом. Установлено, используя кодовое уплотнение данных, можно обеспечить требуемую помехоустойчивость канала передачи (вероятность битовой ошибки $P_В\leq10^{-3}$) при битовом отношении сигнал/шум $h^2_{o(Ц)}=1$ как для гармонических узкополосных, так и импульсных помех [3].

Литература

1. Черенкова Е.Л., Чернышев О.В. Распространение радиоволн. М.: Радио и связь, 1984. 272 с.
2. Галкин В.А. Цифровая мобильная радиосвязь. М.: Горячая линия-Телеком, 2007. 432 с.
3. Зеленевский В.В., Черноусов М.С., Зеленевский Ю.В., Зеленевский А.В. Метод оценки помехоустойчивости цифровых систем передачи с кодовым уплотнением данных при воздействии стационарных помех // Известия Института инженерной физики, 2020. №4(58). С.31-36.
4. Зеленевский В.В., Зеленевский Ю.В., Зеленевский А.В., Дурнов А.С. Статистические характеристики системы передачи с кодовым ортогональным уплотнением данных при воздействии гауссова шума // Электросвязь, 2018. №7. С.42-45.

УДК 621.391

ИНФОРМАЦИОННЫЕ БАЗИСЫ ОТКРЫТОГО СЕТЕВОГО МНОГОКЛЮЧЕВОГО СОГЛАСОВАНИЯ

INFORMATION BASIC SETS OF OPEN NETWORK MULTI-KEY AGREEMENT

Александр Демьянович Синюк
доктор технических наук, доцент
профессор кафедры
«Общепрофессиональных дисциплин»
ФГКВОУ ВПО «Военная академия связи
имени Маршала Советского Союза
С.М. Буденного» МО РФ
Адрес: 194064, г. Санкт-Петербург,
Тихорецкий проспект, д.3
Тел.: +7(960)279-38-86
E-mail: eentrop@rambler.ru

Александр Алексеевич Тарасов
адъюнкт кафедры
«Общепрофессиональных дисциплин»
ФГКВОУ ВПО «Военная академия связи
имени Маршала Советского Союза
С.М.Буденного» МО РФ
Тел.: +7 (968) 710-35-86
E-mail: taras4912@mail.ru

Аннотация

Одним из основных условий функционирования телекоммуникационных систем, использующих криптографические методы защиты информации, является безопасная установка ключей корреспондентам. Сетевая криптосвязность корреспондентов в наибольшей степени подвержена разрушению при компрометации сетевого ключа нарушителем. Актуализируется поиск методов повышения криптосвязности сетевых корреспондентов по открытым каналам связи. Методом теории информации предлагается множество информационных базисов для одновременного открытого формирования нескольких ключей для повышения криптосвязности сетевых корреспондентов. Оценка базисов открытого сетевого многоключевого согласования производится на основе известного метода соответствия тождеств теорий информации и множеств. Выполняется анализ полученных оценок и приводится пример расчета информационных мер, лежащих в основе исследуемых базисов. Определяются условия несовпадения открыто согласованных ключей. Приводятся направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: широковещательный канал связи, нарушитель, ключ, энтропия, взаимная информация, совместная информация, информационная скорость, открытое сетевое многоключевое согласование.

Summary

One of the main conditions for the functioning of telecommunication systems using cryptographic methods of information security is the secure installation of keys to correspondents. The network cryptographic connectivity of correspondents is most susceptible to destruction when the network key is compromised by an enemy. The search for methods of increasing the cryptographic connectivity of network correspondents over the open communication channels is being updated. The method of information theory offers a variety of information basic sets for the simultaneous open formation of several keys to increase the cryptographic connectivity of network correspondents. The evaluation of the basic sets of open network multi-key agreement is based on the well-known method of matching the identities of information theory and theory of sets. The analysis of the obtained estimates is carried out and an example of calculating the information measures underlying the basic sets under study is given. The conditions for mismatch of openly agreed keys are determined. The directions of further research are proposed.

Keywords: broadcast communication channel, enemy, key, entropy, mutual information, joint information, information speed, open network multi-key agreement.

Введение

Одним из главных направлений обеспечения информационной безопасности систем передачи информации, использующих для защиты информации криптографические методы, является эффективное решение задачи формирования, распределения и доставки ключей корреспондентам (пользователям).

Устойчивость к компрометации двухстороннего ключа считается максимальной, т.к. ключ известен двум корреспондентам. В случае, когда ключ становится известным нарушителю необходима его срочная замена. Традиционно эта задача решается с использованием защищенных телекоммуникаций, что достаточно дорого, не всегда целесообразно, часто не оперативно и не

всегда возможно для реализации [1,2]. Кроме этого, может возникнуть необходимость установления криптосвязности с новым, незапланированным корреспондентом. В таких условиях часто используются двухсторонние методы формирования ключа с использованием открытых каналов связи.

Первые известные результаты исследований методов формирования ключей по каналам связи с ошибками были изложены в концепции подслушивающего канала А.Вайнера [3]. Она основывается на асимптотическом описании процесса формирования ключа для двух корреспондентов. Анализируемые модели позволяют описать передачу по открытому каналу связи сообщения (информации) с максимальной неопределенностью (энтропией) для нарушителя. В последствии концепция была развита рядом зарубежных ученых, среди которых можно выделить И.Чисара, Я.Кернера [4] и В.Мауера [5].

Понятие ключевой пропускной способности, введенной В.Мауером [5], определяет асимптотическую эффективность любого конструктивного протокола формирования ключа для двух корреспондентов по открытым каналам связи при заданных вероятностях ошибок в каналах основном и перехвата. Модель Мауера с независимыми каналами позволяет получить положительную величину ключевой пропускной способности независимо от соотношений вероятностей ошибок в каналах связи. Однако, она основана на использовании в дополнение к каналам связи с ошибками еще и каналов без ошибок.

Известны методы с использованием идеального канала связи. Примером могут служить методы формирования ключей Диффи-Хелмана, Мак-Элиса [1,2]. Определение стойкости методов зависит от вычислительной сложности труднорешаемых математических задач (вычисления дискретного логарифма, разложения на множители и др.) и усложняется отсутствием известной точной нижней оценки трудоемкости раскрытия ключа [1,2].

Вероятность компрометации сетевого ключа (СКл) нарушителем увеличивается, т.к. устойчивость к компрометации СКл является минимальной, что обусловлено знанием его всеми разнесенными корреспондентами. Задачи формирования ключа группы корреспондентов значительно сложнее [1,2,6-9].

Первый известный подход основан на использовании метода открытого распределения ключей. Пример метода для группы можно получить путем изменения протокола открытого распределения ключей Диффи-Хеллмана [1,2]. Недостатки метода показаны выше, кроме этого для формирования СКл необходима полносвязная модель связности. Также известен протокол формирования ключа группы из t пользователей, предложенный в статье [10]. Анализ показывает, что для формирования единого ключа кроме недостатков предшествующего метода дополнительно необходимо выполнить $2t(t\text{-}1)$ передач сообщений каждого пользователя всем остальным.

Вторая группа методов распределения СКл основана на концепции шифрования с открытым ключом [2,6]. Тривиальный пример связан с использованием централизованного распределения ключей с помощью одного из протоколов передачи ключей для симметричных криптосистем показан в [2]. Создание центра генерации и распределения ключей вносит серьезную асимметрию между участниками согласования СКл.

Опубликованы результаты исследований метода открытого формирования сетевого (группового) ключа по каналам связи с ошибками без выделения доверенной стороны [11]. Реализация метода требует аутентификации передаваемых сообщений [2].

Ключевая сеть, объединяющая трех и более корреспондентов с общим ключом в наименьшей степени устойчива к компрометации нарушителем [2,6,12]. Закрытый информационный обмен между корреспондентами с нарушенной криптосвязностью становится невозможным и требует незамедлительного решения задачи формирования, распределения и доставки нового СКл корреспондентам. Вышеописанные методы формирования СКл позволяют получить один общий ключ. Если в новом предлагаемом методе формировать вместе с ним дополнительно еще несколько парных ключей (ПКл) между корреспондентами, тогда после выявления факта компрометации СКл использование ПКл позволит быстро восстановить СКл. Уменьшение информационных потерь сети связи, связанных с задержкой передаваемой информации (которое равно временному интервалу восстановления общего ключа) можно получить за счет одновременного формирования, как сетевого ключа, так и парных ключей корреспондентов сети связи [12]. Тогда в условиях компрометации СКл нарушителем у какого-нибудь корреспондента(ов) в парах(двойках) нескомпрометированных корреспондентов остаются действующие ПКл с помощью которых возможно оперативное восстановление сетевой криптосвязности. Поэтому, большой интерес представляет теоретико-информационная оценка возможности осуществления открытого сетевого многоключевого согласования [12]. Актуализи-

руется исследование процесса одновременного формирования по открытым каналам связи между корреспондентами сети, как сетевого ключа, так и ключей между парами корреспондентов методом теории информации [13-15], которое производится в представляемой статье.

Постановка задачи

Рассмотрим процесс передачи информации по сети связи, в которой связность корреспондентов определяется моделью широковещательного канала связи [13,14,16]. Имеется источник информации и один передатчик у корреспондента связи (КС) А и три независимо работающих приемника у КС В, С и нарушителя Е, на входы которых поступают выходные сигналы разных каналов, как показано на рисунке 1. На вход передатчика КС А поступает информация от источника, которую он должен передать одновременно КС В, С и нарушителю Е (приемникам 1, 2 и 3) так, чтобы:

1. КС В (приемник 1) мог получить информацию, которую не получили КС С (приемник 2) и нарушитель Е (приемник 3);
2. КС С (приемник 2) мог получить информацию, которую не получили КС В (приемник 1) и нарушитель Е (приемник 3)
3. КС В (приемник 1) и КС С (приемник 2) могли совместно получить информацию, которую не получил нарушитель Е (приемник 3).

Первая информационная составляющая представляется информационным базисом(основой) для формирования ПКл КС А и В, вторая - ПКл КС А и С и третья – СКл.

Пусть источник сообщений описывается моделью стационарного двоичного источника без памяти [13,14,15]. Алфавит источника задается ансамблем $\{X,p(x)\}$ [17], где X – множество, состоящее из двух (t=2) букв X={0,1}. Источник в каждую единицу времени независимо выбирает i-ю букву из алфавита с равномерным законом распределения вероятностей $p(x_i)$=0,5 [15,17]. Пусть задано достаточно большое n, причем $n\to\infty$. Источник генерирует сообщение $\bar{x}$, представляющее собой случайную последовательность длиной n, причем $\bar{x}\in X^n$, где X^n – n -я декартова степень X [15,17].

Совокупность, состоящая из двух каналов с общим входом (выход источника) и выходами (входы приемников 1,2) описывается моделью дискретного широковещательного канала без памяти (ДШК) [13,14].

Передача сигналов по ДШК производится по двум составляющим каналам с общим входным алфавитом X, выходными алфавитами Y и M и матрицами переходных вероятностей вероятностей

$$P_1=\{p(y/x)\}, P_2=\{p(m/x)\}, x\in X, \quad y\in Y, m\in M.$$

Алфавиты X, Y и M конечны и для любых

$$\bar{x}\in X^n, \bar{y}\in Y^n, \bar{m}\in M^n.$$

Пусть первый составляющий канал связи (СК1), описывается моделью двоичного симметричного канала связи без памяти (ДСК) с вероятностью ошибки p_y, а второй составляющий канал (СК2) – ДСК с вероятностью p_m.

Канал связи между выходом источника КС A и входом приемника 3 нарушителя E представляет собой канал перехвата (КП). Передача сигналов по КП определяется входным алфавитом X, выходным алфавитом z и матрицей переходных вероятностей

$$P_3=\{p(z/x)\}, x\in X, z\in Z.$$

Канал перехвата описывается моделью ДСК с вероятностью ошибки p_z. Составляющие ДШК

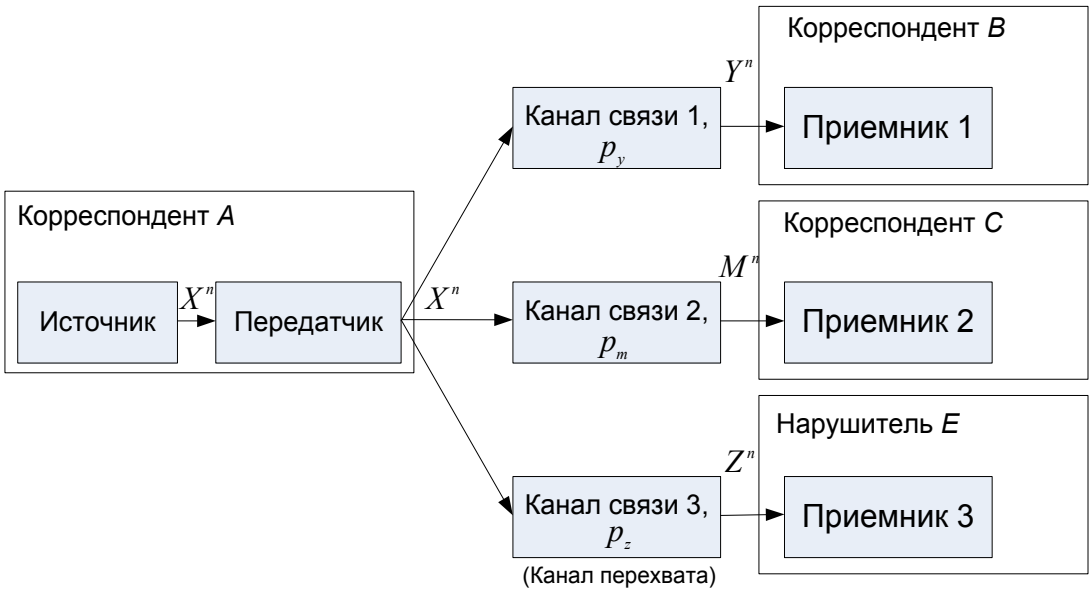


Рис. 1. Модель связности сети связи

и КП являются независимыми каналами [9,12]. Алфавиты источника, входов и выходов ДШК и КП, совпадают.

Пусть вероятности ошибок в ДШК и КП удовлетворяют неравенству:

$$0 < p_y \le p_m < p_z < 0{,}5 . \qquad (1)$$

Цель исследования определяется поиском и исследованием совокупности информационных базисов открытого сетевого многоключевого согласования для формирования различающихся парных и сетевого ключей с использованием метода теории информации.

Теоретико-информационная модель передачи информации в сети связи

Произведем оценку ситуации после передачи последовательности $\bar{x}$ от КС *A* по ДШК. КС *B*, *C*, а также нарушитель *E* принимают свои версии

$$\bar{y} \in Y^n, \quad \bar{m} \in M^n \quad \text{и} \quad \bar{z} \in Z^n,$$

соответственно. Корреспонденты *A*, *B* и *C* получают количество информации, которое характеризует информационная мера (ИМ) совместной информации (СИ) ДШК $F(X^n;Y^n;M^n)$ [11,18,19], КС сети связи *A*, *B* получают количество информации взаимной информации (ВИ) СК1 $I(X^n;Y^n)$ [13, 15], а КС сети связи *A*, *C* – ВИ СК2 $I(X^n;M^n)$. Очевидно, что нарушитель *E* и КС *A* имеют количество ВИ КП $I(X^n;Z^n)$.

Первоначально оценим возможность формирования нескольких несовпадающих ключей из коррелированной информации [12,17], которая может обеспечиваться различием скоростей передачи информации [20] в ДШК, СК1 и СК2. Для некоторого упрощения оценим информационную скорость каждого из каналов по отдельности без учета информации нарушителя. Информационная скорость (ИС) ДШК [бит/симв] может быть определена из выражения [18]:

$$\frac{F\left(X^n;Y^n;M^n\right)}{n} = F\left(X;Y;M\right), \qquad (2)$$

где $F(X;Y;M)$ – средняя СИ между соответствующими символами на входе и выходе ДШК [18]. Подобным образом можно найти скорость в СК1:

$$\frac{I\left(X^n;Y^n\right)}{n} = I\left(X;Y\right) \qquad (3)$$

где $I(X;Y)$ – средняя ВИ между символами на входе и выходе СК1 [13,14] и СК2:

$$\frac{I\left(X^n;M^n\right)}{n} = I\left(X;M\right) \qquad (4)$$

где $I(X;M)$ – ВИ СК2.

Заметим, что для условия (1) ИС не равны и располагаются в порядке возрастания: $F(X;Y;M)<I(X;M)\le I(X;Y)$ [18,19]. Исследования в [13,14,18] показали, что ИМ $F(X;Y;M)$, $I(X;Y)$ и $I(X;M)$ хотя и различны, но достаточно сильно связаны [18]. Возникает сложность формирования различных ключей. Для достижения цели работы необходимо ввести нарушителя, выделить из ИМ (2-4) каждую по отдельности: информацию КС *B и A*, которую можно использовать в качестве информационной основы для формирования ПКл K_{AB}, информацию КС *C и A для формирования ПКл* K_{AC} и информацию КС *B*, *C и A для формирования СКл* K_{ABC}.

Для дальнейшего анализа применим известный метод соответствия между формальными тождествами случайных величин, описывающих ИМ и тождествами, справедливым для произвольной аддитивной функции множеств [14]. Сущность метода заключается в том, что любой ИМ можно поставить в соответствие некоторое выражение теории множеств и, подобно, выполнить обратные преобразования. Тогда передачу символа по ДШК можно представить в виде совокупности множеств. Теоретико-множественное представление переданного символа из ансамбля *X* и принятых символов на выходах ДШК из ансамблей *Y*, *M* и *Z*, соответственно, показано на *рисунке 2*, на котором учтена независимость СК1, СК2, КП, определяющая условие:

$$I(Y;M/X)=I(Y;Z/X)=I(M;Z/X)=0. \qquad (5)$$

Оценка информационных базисов формирования ключей

Анализ *рисунка 2* показывает, что в качестве информационного базиса формирования ПКл K_{AB} (информации КС *B и A, которая не известна КС C и нарушителю E)* может быть выбрана ИМ условной ВИ $I(X;Y/M,Z)$. По аналогии, в качестве информационной основы ПКл K_{AC} может быть предложена – $I(X;M/Y,Z)$. А для формирования СКл K_{ABC} предлагается использовать ИМ условной СИ $F(X;Y;M/Z)$.

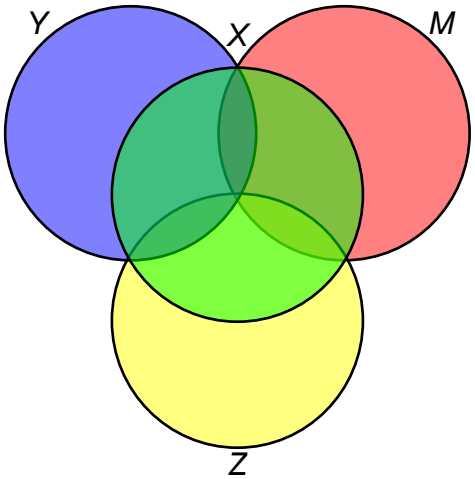


Рис. 2. Теоретико-множественное представление переданного и принятых символов ДШК.

Исследуем выбранные ИМ. Энтропия ансамблей символов на входе и выходах каналов без памяти будет максимальна и равна [13,15]:

$$H(X)=H(Y)=H(M)=H(Z)=1. \quad (6)$$

ВИ $I(X;Y)$ может быть определена из выражения [14]:

$$I(X;Y)=H(Y)-H(Y/X)=1-h(p_y), \quad (7)$$

где $H(Y/X)$ – энтропия СК1, которая для ДСК равна:

$$H(Y/X)=h(p_y), \quad (8)$$

где $h(a)=-a\log_2(a)-(1-a)\log_2(1-a)$ – энтропийная функция ДСК [13].

По аналогии $I(X;M)$ может быть определена из выражения:

$$I(X;M)=H(M)-H(M/X)=1-h(p_m). \quad (9)$$

Найдем условную ВИ $I(X;Y/Z)$. Анализ модели связности сети, показанной на *рисунке 1* показывает, что кроме ДШК, СК1, СК2 и КП имеется широковещательный канал для КС *A*, *B* и нарушителя *E*. Известно [19], что СИ канала $F(X;Y;Z)$ для условий модели равна:

$$F(X;Y;Z)=I(Y;Z), \quad (10)$$

где $I(Y;Z)$ – ВИ составного канала, включающего СК1 и КП определяемая из выражения:

$$I(Y;Z)=H(Y)-H(Y/Z)=1-h(p_y*p_z), \quad (11)$$

где

$$H(Y/Z)=h(p_y*p_z), \quad (12)$$

причем вероятность «свертки» p_y*p_z – вероятность ошибки составного канала, включающего СК1 и КП [13,14,19]:

$$p_y*p_z=p_y(1-p_z)+p_z(1-p_y). \quad (13)$$

Используя определение СИ [18,19], выражения (6)-(8), (10)-(13), а также на основе анализа *рисунка 2* можно записать выражение для $I(X;Y/Z)$ в виде:

$$I(X;Y/Z)=I(X;Y)-F(X;Y;Z)=I(X;Y)-I(Y;Z)=$$
$$=h(p_y*p_z)-h(p_y). \quad (14)$$

Используя (9) и производя операции по аналогии с (10)-(13) находим условную ВИ $I(X;M/Z)$, которая равна:

$$I(X;M/Z)=I(X;M)-F(X;M;Z)=$$
$$=I(X;M)-I(M;Z)=h(p_m*p_z)-h(p_m). \quad (15)$$

Используя теоретико-множественное представление ИМ, показанное на *рисунке 2*, определим ИМ $I(X;Y/M,Z)$ и $I(X;M/Y,Z)$. Для этого найдем ВИ:

$$I(X;YZ)=I(X;Y)+I(X;Z/Y)=1+h(p_y*p_z)-h(p_y)-h(p_z), \quad (16)$$

$$I(X;MZ)=I(X;M)+I(X;Z/M)=1+h(p_m*p_z)-h(p_m)-h(p_z). \quad (17)$$

Определим энтропию $H(X/YMZ)$. Для этого найдем условную вероятность передачи символа *x* при известных символах *y*, *m*, *z*:

$$p(x/ymz)=\frac{p(xymz)}{p(ymz)}=\frac{p(y/x)p(m/x)p(z/x)}{\sum_{\forall x}p(y/x)p(m/x)p(z/x)} \quad (18)$$

Тогда по определению энтропии [13,14,15] и с учетом (18) найдем $H(X/YMZ)$:

$$H(X/YMZ)=-0{,}5\sum_{\forall x}\sum_{\forall y}\sum_{\forall m}\sum_{\forall z}p(y/x)p(m/x)p(z/x)\log_2(p(x/ymz)) \quad (19)$$

Теперь определим $I(X;YMZ)$.

$$I(X;YMZ)=H(X)-H(X/YMZ)=1-H(X/YMZ). \quad (20)$$

Найдем $I(X;Y/M,Z)$ путем анализа *рисунка 2* с использованием (17), (19), (20), в итоге получаем:

$$I(X;Y/M,Z)=I(X;YMZ)-I(X;MZ)=$$
$$=h(p_m)+h(p_z)-h(p_m*p_z)-H(X/YMZ). \quad (21)$$

По аналогии найдем $I(X;M/Y,Z)$.

$$I(X;M/Y,Z)=I(X;YMZ)-I(X;YZ)=$$
$$=h(p_y)+h(p_z)-h(p_y*p_z)-H(X/YMZ). \quad (22)$$

После этого можно оценить $F(X;Y;M/Z)$. Известно [18,19], что СИ $F(X;Y;M/Z)$ равна:

$$F(X;Y;M/Z)=I(Y;M/Z). \quad (23)$$

Тогда, с использованием (14) и (21) получаем

$$I(Y;M/Z)=I(X;Y/Z)-I(X;Y/M,Z)=$$
$$=h(p_y*p_z)+h(p_m*p_z)+H(X/YMZ)-h(p_y)-h(p_m)-h(p_z). \quad (24)$$

Таким образом, найдены оценки искомых информационных базисов, для формирования ПКл и СКл:

$$F(X;Y;M/Z),\ I(X;Y/M,Z),\ I(X;M/Y,Z).$$

Сравнительный анализ и пример расчета информационных базисов

Полученные оценки

$$F(X;Y;M/Z),\ I(X;Y/M,Z),\ I(X;M/Y,Z)$$

для условия (1) могут соответствовать совмещенному неравенству:

$$F(X;Y;M/Z)<I(X;M/Y,Z)\le I(X;Y/M,Z). \quad (25)$$

Правая часть (25), которая соответствует выражению:

$$I(X;M/Y,Z)\le I(X;Y/M,Z)$$

с учетом (21) и (22) преобразуется к новому неравенству:

$$h(p_m)-h(p_y)>h(p_m*p_z)-h(p_y*p_z). \quad (26)$$

Известно [13-15], что энтропийная функция ДСК $h(a)$ (упомянутая в (8)) является возрастающей на интервале $a\in[0:0{,}5]$, причем скорость возрастания $h(a)$ при малых значениях аргумента $a(a\to 0)$ больше, чем при больших значениях a $(a\to 0{,}5)$. Анализ выражения для свертки вероятностей, приведенный в (13) показывает, что при условии (1) приращение аргумента без свертки больше приращения аргумента со сверткой, т.е.:

$$p_m-p_y>(p_m*p_z)-(p_y*p_z). \quad (27)$$

Вышеописанные обстоятельства определяют истинность (26) и, следовательно, можно утверждать об истинности правой части (25), которая соответствует выражению:

$$I(X;M/Y,Z)<I(X;Y/M,Z).$$

Левая часть (25), т.е. условие:

$$F(X;Y;M/Z)<I(X;M/Y,Z)$$

с учетом сложной взаимной нелинейной зависимости

$$F(X;Y;M/Z) \text{ и } I(X;M/Y,Z)$$

(выражения (22), (24)) в рамках $I(X;M/Z)$ (как по-

казано на *рисунке 2*) при выполнении (1), а также примерно равных значениях вероятностей ($p_y \approx p_m \approx p_z$) выполняется, как это показано в нижеприведенном примере расчета информационных базисов.

Пример расчета

Пусть выполняется условие (1) и $p_y=9*10^{-2}$, $p_m=1*10^{-1}$, $p_z=1{,}1*10^{-1}$. Расчеты, выполненные в соответствии (6)-(24) позволили получить следующие оценки ИМ:

$F(X;Y;M/Z)=1{,}091*10^{-1}$[бит/симв];

$I(X;M/Y,Z)=1{,}192*10^{-1}$[бит/симв];

$I(X;Y/M,Z)=1{,}394*10^{-1}$[бит/симв].

Условие (25) выполняется.

Ранее рассмотрены условия формирования несовпадающих ключей на основе единой передаваемой последовательности, которые обеспечиваются выполнением условия (1) и различными ИС в выражениях (2)-(4). С учетом условия (25) оценки ИС каналов могут располагаться по возрастанию. Предположим, что для формирования любого ключа достаточно передать по каналу связи количество информации равное S бит, причем выполняется условие:

$$S=nF(X;Y;M/Z). \qquad (28)$$

Для формирования ПКл K_{AB} и ПКл K_{AC} могут быть найдены численные значения количества символов для передачи $n1$ и $n2$:

$$n1=\frac{S}{I(X;Y/M,Z)}, \quad n2=\frac{S}{I(X;M/Y,Z)} \qquad (29)$$

Заметим, что числа n, $n1$, $n2$ в общем случае не равны и, например, для условия (25) удовлетворяют неравенству:

$$n1 \le n2 < n. \qquad (30)$$

Анализ (30) показывает, что если для формирования информационной базиса СКл необходимо передать по ДШК последовательность $\bar{x}$ (и принять на выходах ДШК $\bar{y}$ и $\bar{m}$) длиной n символов, то для формирования ПКл КС A и C можно использовать из $\bar{x}$ и $\bar{m}$ меньшее число $n2$ соответствующих символов, а для ПКл КС A и B можно использовать из $\bar{x}$ и $\bar{y}$ еще меньшее число $n1$ символов. Это обуславливает возможность формирования различных ключей. Даже при условии равенства ИС вероятность различия ключей будет высокой, что дополнительно связано с высокой вероятностью формирования различных векторов ошибок в каналах связи [13,14,15].

Заключение

Подводя итог, отметим, что в работе с использованием методологии теории информации предлагается множество информационных базисов для одновременного открытого формирования нескольких ключей для повышения криптосвязности сетевых корреспондентов. В ходе дальнейшего исследования использован известный метод соответствия информационных тождеств и тождеств теории множеств для получения оценок выбранных базисов в зависимости от качества каналов сети. Приведен пример расчета оценок выбранных ИМ. Выполнение условия (1) определяет формирование различных ИС передачи информации в каналах связи и обеспечивает формирование различных парных и сетевого ключей после передачи в сети связи единой случайной последовательности. Это обстоятельство дополнительно усиливается высокой вероятностью формирования различных векторов ошибок в каналах связи.

Результаты проведенных исследований показывают, что после передачи случайной последовательности по ДШК найдены оценки информационных базисов для формирования нескольких ключей в сети связи, что создает предпосылки для развития направления многоключевого согласования.

В качестве направлений дальнейших исследований предлагается построение теоретико-информационной модели открытого сетевого многоключевого согласования, основанной на предложенных информационных базисах при передаче асимптотических длин последовательностей для получения оценок информационной эффективности. Интересным остается ответ на вопрос о возможности или ограничениях многоключевого согласования в случаях, когда не выполняется условие (1) по качеству каналов связи. Поэтому, задача точной оценки условий подобных случаев выбрана вторым направлением дальнейших исследований. В роли других направлений представляются синтез необходимых для практики конструктивных протоколов открытого сетевого многоключевого согласования, оценка возможностей применения ключей и уменьшения времени восстановления криптосвязности, обобщение результатов на другие модели источников и широковещательных каналов с большим числом корреспондентов и др.

Литература

1. Шнайер Б. Прикладная криптография. Протоколы, алгоритмы и исходные тексты на языке С: Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. 568 с.

2. Алферов А.П., Зубов А.Ю., Кузьмин А.С., Черемушкин А.В. Основы криптографии: Учебное пособие. 3-е изд., испр. и доп. М.: Гелиос АРВ, 2005. 480 с.

3. Wyner A. The wire–tap channel, Bell Syst. Techn, 1975. Vol.54. №8. Pp. 1355-1387.

4. Csisar I., Korner J. «Broadcast channels with confidential messages», IEEE IEEE Transactions on Information Theory, 1978. Vol.24. №3. Pp. 339-348.
5. Maurer U. «Secret Key Agreement by Public Discussion Based on Common Information», IEEE Transactions on Information Theory, 1993. Vol.39. Pp. 733-742.
6. Фергюсон Н., Шнайер Б. Практическая криптография: Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. 424 с.
7. Group Key Agreement with Local Connectivity Shaoquan Jiang IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing Year, 2016, Vol.13. Issue 3. Pp. 326-339.
8. Group Key Agreement Protocol Based on Privacy Protection and Attribute Authentication// Zhang Qikun; Li Yongjiao; Gan Yong; Zheng Chuanyang; Luo Xiangyang; Zheng Jun IEEE Access (Vol.7). Pp. 87085-87096. Date of Publication: 02 July 2019.
9. Zhouzhou Li, Honggang Wang, Hua Fang. Group-Based Cooperation on Symmetric Key Generation for Wireless Body Area Networks. IEEE Internet of Things Journal, 2017. №4(6). Pp. 1955-1963.
10. Burmester M., Desmedt Y. A secure and efficient conference key distribution system // Advances in Cryptology. EUROCRYPT' 89. LNCS 434. 1990. Pp. 122-133.
11. Sinjuk A.D., Ostroumov O.A. Theorem about key capacity of a communication network // Information and Control Systems, 2018. №(5). Pp.79-87.
12. Синюк А.Д., Тарасов А.А. Оценка условий открытого сетевого многоключевого согласования // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: X Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сборник научных статей, Санкт-Петербург, 24–25 февраля 2021 года. СПб: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2021. С. 409-413.
13. Колесник В.Д., Полтырев Г.Ш. Курс теории информации. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. 416 с.
14. Чисар И., Кернер Я. Теория информации: теоремы кодирования для дискретных систем без памяти: Пер. с англ. М.: Мир, 1985. 400 с.
15. Галлагер Р. Теория информации и надежная связь. Пер. с англ., под ред. М.С. Пинскера и Б.С. Цыбакова. М.: Советское радио, 1974. 720 с.
16. Cover T.M. «Broadcast Channels» – IEEE Transactions on Information Theory, 1972. Vol.18. №1. Pp. 2-14.
17. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: Учеб. для вузов. 9-е изд. стер. М.: Издательский центр «Академия», 2003. 576 с.
18. Остроумов О.А., Синюк А.Д. Исследование совместной информации // Информация и космос, 2017. №3. С. 55-58.
19. Синюк А.Д. Формирование трехстороннего шифрключа по открытым каналам связи с ошибками: монография. СПб.: Военная академия связи, 2009. 360 с.
20. Фано Р. Передача информации. Статистическая теория связи. М.: Мир, 1965. 366 с.

УДК 621.394

ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ПРОВЕРОК ДЛЯ ИСПРАВЛЕНИЯ СТИРАНИЙ ЗА ПРЕДЕЛАМИ МИНИМАЛЬНОГО КОДОВОГО РАССТОЯНИЯ

CONSTRUCTION SYSTEM ORTHOGONAL CHECKS FOR CORRECTION OF ERASURES OUTSIDE MINIMUM CODE DISTANCE

Владислав Валентинович Квашенников
доктор технических наук
ведущий научный сотрудник
АО «КНИИТМУ»
Адрес: 248000, г. Калуга, ул. К. Маркса, д.4
Тел.: 8 (910) 864-52-75
E-mail:kvashienvv@mail.ru

Аннотация

Описан алгоритм декодирования линейных помехоустойчивых кодов с исправлением стираний за пределами минимального кодового расстояния. Приведена нижняя оценка доли корректируемых стираний с учетом спектра кода, а также дана оценка случайного кодирования. Выполнено сравнение вероятности правильного приема в биномиальном канале связи при декодировании с исправлением стираний за пределами минимального кодового расстояния и с исправлением ошибок и стираний в пределах минимального кодового расстояния. Декодирование с исправлением стираний за пределами минимального кодового расстояния обеспечивает значительно большую вероятность правильного приема по сравнению с исправлением ошибок или стираний в пределах минимального кодового расстояния. Показано, что сложность алгоритма декодирования двоичных кодов с коррекцией стираний за пределами минимального кодового расстояния не превосходит величины $O(sn)$, где n – блоковая длина кода, а s – число стираний. Рассмотрен пример декодирования двоичного кода БЧХ (15,7,5) с коррекцией 6-ти стираний.

Ключевые слова: Декодирование помехоустойчивых кодов с коррекцией стираний, ортогональные проверочные соотношения, сложность декодирования.

Summary

An algorithm for decoding linear noise-resistant codes with correction of erasures beyond the minimum code distance is described. A lower estimate of the proportion of corrected erasures is given, taking into account the code spectrum, and an estimate of random encoding is also given. The probability of correct reception in the binomial channel of the signal during decoding with correction of erasures beyond the minimum code distance and with correction of errors and erasures in the limits of the minimum code distance is compared. Decoding with erasure correction beyond the minimum code distance provides a significantly higher probability of correct reception compared to correcting errors or erasures within the minimum code distance. It is shown that the complexity of the algorithm for decoding binary codes with correction of erasures beyond the minimum code distance does not exceed the value $O(sn)$, where n is the block length of the code, and s is the number of erasures. An example of decoding the binary code of the BCH (15,7,5) with correction of 6 erasures is considered.

Keywords: Decoding of noise-resistant codes with erasure correction, orthogonal verification ratios, decoding complexity.

Введение

Важным направлением повышения помехоустойчивости передачи сообщений по каналам связи с ошибками является использование помехоустойчивых кодов. Декодирование помехоустойчивых кодов может выполняться с исправлением ошибок и(или) с исправлением стираний. Декодирование кодов с исправлением стираний существенно проще, чем декодирование с исправлением ошибок, а по помехоустойчивости не хуже, чем декодирование с исправлением ошибок, а во многих случаях, лучше, поскольку число исправляемых стираний вдвое больше числа исправляемых ошибок. Дальнейшее повышение помехоустойчивости возможно при декодировании с исправлением стираний за пределами минимального кодового расстояния. Однако эффективное декодирование с исправлением стираний возможно только в стирающем канале связи, в котором имеются оценки достоверностей символов, обеспечивающие надежное стирание ошибочных символов кода [1]. Даже небольшое число ошибок, остающихся после стирания недостоверных символов, приводит к ошибочному декодированию помехоустойчивого кода. Вероятность стирания символов с ошибками должна быть как можно ближе к 1.

В настоящей статье описан алгоритм декоди-

рования линейных помехоустойчивых кодов с исправлением стираний на основе ортогональных проверок. Проверочное соотношение кода называется ортогональным, если в него входит только одно стирание, а остальные символы кода известны, что позволяет исправить это стирание [2]. Проверочные соотношения кода представляют собой линейные комбинации строк проверочной матрицы кода. В известных работах для декодирования стираний предлагается выполнять проверку на ортогональность всех проверочных соотношений помехоустойчивых кодов [3,4]. При большой избыточности кода такое декодирование требует вычисления чрезвычайно большого числа проверочных соотношений и сложно для реализации. Регулярная процедура Грамма-Шмидта построения ортогональных проверочных соотношений на основе проверочной матрицы существенно упрощает декодирование. Алгоритм является универсальным и может использоваться для декодирования произвольных линейных помехоустойчивых кодов. Гарантированно исправляются все стирания в пределах минимального кодового расстояния $s \le d-1$, где d – минимальное кодовое расстояние. Исправляется довольно большая доля стираний за пределами минимального кодового расстояния, вплоть до $n-k$ стираний, где n – блоковая длина, а k – информационная длина кода. Алгоритм декодирования полностью реализует потенциальную способность кода по исправлению стираний.

Оценивание доли стираний, исправляемых за пределами минимального кодового расстояния

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

При $s=d\ldots n-k$ стираниях число линейно независимых столбцов равно разности между общим числом наборов из s столбцов проверочной матрицы и числом конфигураций из s линейно зависимых столбцов. Любая конфигурация из s линейно зависимых столбцов проверочной матрицы может быть получена добавлением j столбцов к набору из $s-j$ столбцов с нулевой суммой, соответствующей кодовому слову. Число способов выбора указанных j столбцов равно числу сочетаний из $n-s+j$ по j. Поэтому, для кода со спектром $A_0, A_1, \ldots A_n$ нижняя оценка доли линейно независимых столбцов [5,6]

$$P_s \ge \frac{C_n^s - \sum_{j=0}^{s-d} A_{s-j} C_{n-s+j}^j}{C_n^s}, \; s = d \ldots n-k. \qquad (1)$$

Для кодов БЧХ(15,7,5) и БЧХ(31,16,7), имеющих соответственно спектры

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

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

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

Видно, что хотя доля исправляемых стираний убывает с увеличением s, однако, остается довольно высокой. В предельном случае коды могут корректировать даже некоторые стирания веса $n-k$.

Приближенно вычислить долю исправляемых стираний можно используя оценку случайного кодирования. Для этой оценки s стираний не будут корректироваться, если хотя бы одна из 2^{s-1} линейных комбинаций столбцов проверочной матрицы будет равна либо 0, либо последнему s столбцу

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

где начальное условие

$$P_d = 1 - \frac{1}{2^{n-k-d+1}}. \qquad (3)$$

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

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

$$P_1 = \sum_{i=0}^{d-1} C_n^i p^i (1-p)^{n-i}, \qquad (4)$$

Таблица 1

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

где p – вероятность стирания.

С учетом стираний за пределами минимального кодового расстояния вероятность приема кода

$$P_2 = \sum_{i=0}^{d-1} C_n^i p^i (1-p)^{n-i} + \sum_{i=d}^{s} P(i) C_n^i p^i (1-p)^{n-i}, s = d...n-k, \quad (5)$$

где $P(i)$ – доля исправляемых стираний *(таблица 1)*.

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

Декодирование с исправлением стираний за пределами минимального кодового расстояния обеспечивает значительно большую вероятность правильного приема по сравнению с исправлением ошибок или стираний в пределах минимального кодового расстояния.

Алгоритм декодирования

Декодирование помехоустойчивого кода выполняют с использованием ортогональных проверочных соотношений кода. Запишем проверочную матрицу помехоустойчивого кода

$$H = \begin{vmatrix} h_0 \\ h_1 \\ \dots \\ h_{n-k-1} \end{vmatrix}, \quad (6)$$

где h_i – строки проверочной матрицы кода.

Линейные комбинации строк проверочной матрицы кода образуют проверочные соотношения кода

$$r = a_0 h_0 + a_1 h_1 + \dots + a_{n-k-1} h_{n-k-1},$$

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

Число проверочных соотношений для двоичных кодов $N=2^{n-k}$, что даже при относительно небольшой избыточности кода $n-k=20$ дает $N>10$. Проверить ортогональность столь большого числа контрольных соотношений кода весьма сложно. Упростить декодирование позволяет вычисление контрольных ортогональных соотношений на основе ортогонализации Грамма-Шмидта проверочной матрицы помехоустойчивого кода относительно позиций стертых символов. Линейно независимые столбцы проверочной матрицы, соответствующие позициям стертых символов, приводят к виду, при котором в этих столбцах будет только одна 1, а остальные элементы равны 0. Ортогонализацию выполняют путем тождественных преобразований строк матрицы, включающие операции сложения строк между собой, умножения строк матрицы на постоянный элемент поля Галуа и перестановки строк матрицы.

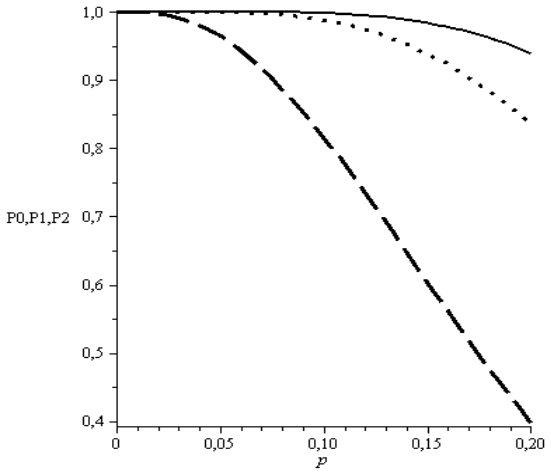


Рис. 1. Вероятности правильного декодирования кода БЧХ(15,7,5)

Запишем проверочную матрицу (1) кода в виде

$$H = \begin{vmatrix} h_{00} & h_{01} & \dots & h_{0n-1} \\ h_{10} & h_{11} & \dots & h_{1n-1} \\ \dots \\ h_{n-k-1,0} & h_{n-k-1,1} & \dots & h_{n-k-1,n-1} \end{vmatrix} \quad (7)$$

где h_{ij}, $i=0..n-k-1$, $j=0..n-1$ – элемент поля Галуа $GF(p^m)$.

Допустим, позиции стираний $j_1, j_2, \dots j_s$, тогда процедура ортогонализации запишется:

Шаг 1. $f=1$

Шаг 2. $j=f$

Шаг 3. Выбираем j столбец проверочной матрицы, а в этом столбце выделяем первый элемент, отличный от нуля h_{ij}

Шаг 4. Делим все элементы i строки на h_{ij}.

Шаг 5. Для всех $w=0\dots n-k-1$, $w \neq i$ умножаем i строку матрицы на h_{wj} и складываем ее поэлементно с w строкой

Шаг 6. Переставляем между собой f строку и i строку матрицы

Шаг 7. Если $f=s$, то идти Шаг 8, иначе $f=f+1$ идти Шаг 2

Шаг 8. Конец

После выполнения этой процедуры 1-й элемент j_1-го столбца проверочной матрицы будет равен 1, остальные элементы этого столбца будут равны 0. Аналогично 2-й элемент j_2-го столбца проверочной матрицы будет равен 1, остальные элементы этого столбца будут равны 0 и т.д. В результате ортогонализации первые s строк проверочной матрицы будут представлять собой ортогональные проверочные соотношения для исправления s стираний [7]. Получение нулевой строки проверочной матрицы на Шаге 3

будет означать невозможность дальнейшей ортогонализации матрицы.

Примером ортогональной проверочной матрицы относительно позиций проверочных символов является проверочная матрица в систематической форме

$$H = \left| P \;\; I \right|, \qquad (8)$$

где P – некоторая матрица размера $(n\text{-}k)\times k$;
I – единичная матрица размера $(n\text{-}k)\times(n\text{-}k)$.

Проверочную матрицу в систематической форме можно использовать для вычисления стертых проверочных символов кода через информационные символы. Проверочная матрица в систематической форме позволяет исправить стирания всех проверочных символов кода, а для циклических кодов – циклические сдвиги стираний всех проверочных символов кода.

Для сокращения вычислений можно определить ранг матрицы из столбцов проверочной матрицы стертых символов [8]. Если ранг этой матрицы меньше числа стертых символов, то декодирование с исправлением стираний будет невозможно. Для определения ранга матрицы достаточно вычислить определитель из соответствующих столбцов проверочной матрицы [9].

Алгоритм декодирования с коррекцией s стираний сводится к ортогонализации s столбцов проверочной матрицы и вычислению значений стираний. Вычислительная сложность вычислений пропорциональна числу sn^2 операций сложения и умножения над полем Галуа $GF(p^m)$, т.е. сложность имеет порядок $O(sn^2)$ [10,11]. Для двоичного кода с векторными операциями сложения и умножения сложность будет оцениваться $O(sn)$.

Пример декодирования двоичного кода

Рассмотрим декодирование с исправлением стираний двоичного помехоустойчивого кода БЧХ (15,7,5), блоковая длина которого $n=15$, информационная длина $k=7$, а минимальное кодовое расстояние $d=5$, что гарантированно позволяет исправлять $s\le 4$ стираний. Исправление кодом стираний за пределами минимального кодового расстояния соответствует $s>4$. Проверочная матрица кода [12]

$$H = \begin{vmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \ldots & \alpha^{14} \\ 1 & \alpha^3 & \alpha^6 \ldots & \alpha^{12} \end{vmatrix},$$

где α – примитивный элемент поля $GF(2^4)$ с генераторным многочленом x^4+x+1.

Пусть передавался код БЧХ

$$B = 100110111000010,$$

а принят код с 6 стираниями

$$A = 10a_{12}a_{11}10a_8 1a_6 0a_4 001a_0,$$

где a_i обозначены стирания на $i=12,11,8,6,4,0$ позициях кода. Проверочная матрица кода в двоичной форме

$$H = \begin{vmatrix} 100010011010111 \\ 010011010111100 \\ 001001101011110 \\ 000100110101111 \\ 100011000110001 \\ 000110001100011 \\ 001010010100101 \\ 011110111101111 \end{vmatrix}.$$

Ортогональные контрольные проверки относительно позиций стертых символов

$$H_1 = \begin{vmatrix} 101000010100011 \\ 001011010010010 \\ 011100110100001 \\ 001101011110001 \\ 010100000111001 \\ 001100000010111 \end{vmatrix}.$$

Отсюда из строк матрицы значения стертых символов

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

что совпадает с исходным кодом БЧХ без стираний.

Было исправлено 6 стираний символов кода, что за пределами минимального кодового расстояния $d\text{-}1=4$.

Заключение

Предложенный в статье алгоритм позволяет декодировать линейные помехоустойчивые коды с исправлением стираний за пределами минимального кодового расстояния за счет ортогонализации Грамма-Шмидта проверочной матрицы относительно позиций стираний символов кода. Исправление стираний за пределами минимального кодового расстояния кода $s>d\text{-}1$ возможно, если ранг матрицы из столбцов проверочной матрицы, соответствующих стертым символам, не меньше числа стираний. Декодирование помехоустойчивого кода с исправлением стираний на основе ортогональных проверок является универсальным, его можно применять для произвольного линейного по-

мехоустойчивого кода. Для применения предлагаемого алгоритма декодирования требуются надежные оценки достоверности принятых символов кода, с высокой вероятностью обеспечивающая стирание всех ошибочных символов кода. Декодирование с исправлением стираний имеет относительно небольшую сложность. Высокая помехоустойчивость обеспечивается за счет довольно большой доли стираний, исправляемых за пределами минимального кодового расстояния. Алгоритм полностью реализует потенциальную способность кода по исправлению стираний.

Литература

1. Chase D.A Class of Algorithms for Decoding Block Codes with Channel Measurement Information // IEEE Trans. Info. Vol.IT-18. 1972. Pp. 170-182.
2. Колесник В.Д., Мирончиков Е.Т. Декодирование циклических кодов. М. Связь, 1968. 251 с.
3. Попов О.В. Об исправлении стираний циклическими кодами. Передача цифровой информации по каналам с памятью. М.: Наука, 1970. С.11-24.
4. Гладких А.А. Основы теории мягкого декодирования избыточных кодов в стирающем канале связи. Ульяновск: УлГТУ, 2010. 379 с.
5. Попов О.В. Об оценке способности линейных кодов исправлять стирания и обнаруживать ошибки при наличии стираний //Электросвязь, 1967. №10.
6. Афанасьев В.Б., Давыдов А.А., Зигангиров Д.К. Оценка доли стираний, исправляемых линейными кодами //Информационные процессы, 2016. Т. 16. №4. С. 382-404.
7. Квашенников В.В. Патент РФ №2746797 МПК H03M 13/13. Способ декодирования линейных помехоустойчивых кодов с исправлением стираний. Приор. 03.11.2020. Опубл. 21.04.2021. Бюл. №12.
8. McElliece R.I. The Theory of Information and Coding. Addison-Wesley, 1977. 383 p.
9. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. М.: Наука, 1967. 575 с.
10. Воеводин В.В. Вычислительные основы линейной алгебры. М.: Наука, 1977. 304 с.
11. Мальцев А.И. Основы линейной алгебры. М.: Наука, 1975. 398 с.
12. Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. М.: Техносфера, 2005. 320 с.

УДК 654.16; 623.618

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА В БАЗОВОМ СЕГМЕНТЕ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СЕТИ ПРИ РАЗЛИЧНОМ КАЧЕСТВЕ КАНАЛОВ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

FEATURES OF MODELING INFORMATION EXCHANGE IN THE BASIC SEGMENT OF A HIERARCHICAL NETWORK WITH DIFFERENT QUALITY OF DATA TRANSMISSION CHANNELS

Александр Анатольевич Москвин
кандидат технических наук
начальник отдела
АО «Корпорация «Комета»
Адрес: 115088, Москва,
ул. Велозаводская, д. 5
Тел.: +7 (905) 722-92-23
E-mail: moskvin375@rambler.ru

Владимир Петрович Данилов
кандидат технических наук, доцент
заведующий кафедрой
«Информационные системы и технологии»
Учебный центр «Интеграция» МАИ
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Октябрьская, д. 21
Тел.: +7 (915) 352-08-62
E-mail: danmai7@yandex.ru

Аннотация

Структура автоматизированных систем управления территориально распределенными объектами является, как правило, иерархическая и представляет собой совокупность звеньев управления, взаимодействующих между собой посредством радиально-узловой сети передачи данных. Рассматриваемые системы управления включают совокупность базовых сегментов, каждый из которых есть радиальная сеть звеньев управления смежных уровней иерархии. При определении вероятностно-временных характеристик доставки одного пакета сообщения в базовом сегменте автоматизированной системы управления, использующем каналы передачи данных различного качества, отмечается ряд некорректностей, связанных с несовершенством используемого математического аппарата. В работе проанализированы получаемые на основе существующего подхода данные и предложен способ устранения некорректностей путем использования дополнительных фиктивных состояний, применение которых позволяет получить в рамках теории конечных марковских цепей значения времени и вероятности доведения сообщений, соответствующие физике исследуемого процесса.

Ключевые слова: автоматизированная система управления, вероятностно-временная характеристика, базовый сегмент, фиктивное состояние, граф состояний и переходов, поглощающая конечная марковская цепь, матрица переходных вероятностей, уравнение Колмогорова-Чепмена.

Summary

The structure of automated control systems for geographically distributed objects is, as a rule, hierarchical and is a set of control links interacting with each other through a radial-nodal data transmission network. The control systems under consideration include a set of basic segments, each of which is a radial network of control links of adjacent levels of the hierarchy. When determining the probabilistic and temporal characteristics of the delivery of one message packet in the basic segment of an automated control system using data transmission channels of different quality, a number of incorrectnesses are noted associated with the imperfection of the mathematical apparatus used. The paper analyzes the data obtained on the basis of the existing approach and proposes a method for eliminating incorrectness by using additional fictitious states, the use of which makes it possible to obtain, within the framework of the theory of finite Markov chains, the values of time and probability of delivering messages that correspond to the physics of the process under study.

Keywords: automated control system, probabilistic-temporal characteristic, base segment, fictitious state, graph of states and transitions, absorbing finite Markov chain, matrix of transition probabilities, Kolmogorov-Chapman equation.

Введение

При определении возможностей автоматизированных систем управления (АСУ) территориально распределенными объектами по выполнению возложенных задач приоритетной является оценка качества информационного обмена (ИО) между ее звеньями управления (ЗУ). Из анализа таких АСУ следует, что:

- структура АСУ территориально распределенными объектами, как правило, является иерархической, вариант которой представлен на *рисунке 1(а)*;
- в общем виде АСУ представляет собой совокупность ЗУ, взаимодействующих между собой посредством радиально-узловой сети передачи данных (СПД). Рассматриваемые АСУ включают совокупность базовых подсетей (сегментов) (БС), каждый из которых есть радиальная сеть ЗУ смежных уровней иерархии [1,2] (без рокадных связей), состоящая из верхнего ЗУ (ВЗУ) и нескольких нижних ЗУ (НЗУ). Информационный обмен в БС осуществляется по принципу «точка – многоточка». Структура типового БС АСУ представлена на *рисунке 1(б)*;
- для реализации ИО между соседними ЗУ, как правило, используют направления связи с прямыми и обратными парциальными каналами передачи данных (ПД), пропускная способность (V) которых одинакова для всей АСУ [3];
- методической базой построения процедур ИО между ЗУ является эталонная модель взаимодействия открытых систем (ЭМВОС). Ввиду того что используемые в СПД каналы ПД могут быть невысокого качества по вероятности ошибки на элементарный символ, наиболее востребованным протоколом канального уровня в такой сети является биториентированная процедура LAP-B (HDLC), определяемая протоколом X.25 [4]. Алгоритмы (протоколы) ИО между ЗУ на сеансе связи являются однообразными для всей АСУ.

Отличительной особенностью функционирования СПД между ЗУ является то, что доведение сообщений в них осуществляется с использованием решающей обратной связи (РОС). При этом в сети происходит повтор информационных (пакетов сообщений) и квитанционных кадров [5,6]. Размеры кадров, количество и порядок обмена при реализации РОС определяется алгоритмом (протоколом) ИО.

Общая характеристика проблематики работы

Основными параметрами ИО, определяющими его качество, являются своевременность и достоверность ПД. При этом оба эти свойства оцениваются одним показателем – вероятностно-временной характеристикой (ВВХ), под которой понимается вероятность доставки сообщения фиксированной длины за время, не превышающее допустимое:

$$P_{\text{дов}}(T_{\text{дов}} \le T_{\text{дов}}^{\text{доп}}) \ge P_{\text{дов}}^{\text{треб}}, \qquad (1)$$

где $P_{дов}$, $T_{дов}$ – вероятность и время доведения сообщения;

$P_{\text{дов}}^{\text{треб}}$, $T_{\text{дов}}^{\text{доп}}$ – требуемая вероятность и допустимое время доведения сообщения.

Наиболее удобным математическим аппаратом для определения ВВХ ИО являются конечные марковские цепи (КМЦ).

Из анализа процесса ИО в СПД АСУ территориально распределенными объектами, следует, что задача определения ВВХ ИО в них базируется на результатах оценки своевременности доставки одного П в БС (*рисунок 1(б)*) [3].

В работах по теории КМЦ [3,7,8] изложены марковские модели ИО в базовых сегментах СПД при одинаковых по вероятности ошибки на элементарный символ каналах ПД между ВЗУ и НЗУ. Однако, в АСУ территориально распределенными объектами, использующих радиоканалы ПД, такое однообразие встречается редко из-за помеховых воздействий различной природы. Поэтому анализ ИО и определение ВВХ доставки сообщений в БС иерархической СПД при различном качестве каналов ПД является актуальным.

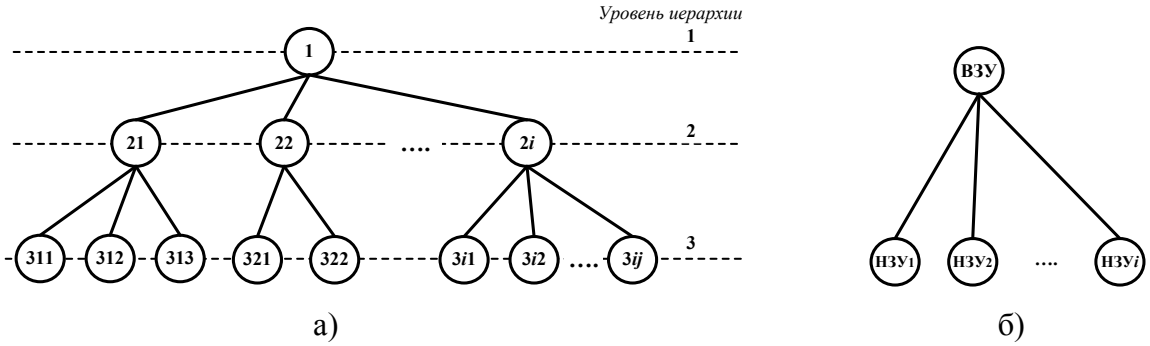


Рис. 1. Структурные схемы соединений, используемые в радиально-узловых СПД иерархических АСУ

Марковская модель ИО в БС иерархической СПД при различном качестве каналов ПД

При передаче циркулярных сообщений в СПД АСУ территориально распределенными объектами возможны различные варианты БС на соответствующих уровнях иерархии: одно ЗУ-отправитель (ЗвО) – два ЗУ-получателя (ЗвП), одно ЗвО – три ЗвП и так далее. Для нахождения ВВХ доведения сообщения до ЗвП необходимо построить адекватные каждому варианту БС с учетом заданных протоколов ИО марковские модели.

Рассмотрим основные закономерности построения таких моделей на примере доведения однопакетного сообщения в БС, включающего одно ЗУ-отправитель и два ЗУ-получателя (*рисунок 2(а)*) при двух повторах пакета (П) и одном повторе квитанции (Кв). При этом будем полагать, что пропускные способности каналов ПД (V) и параметры протоколов ИО одинаковы для всех элементов БС.

Анализ процесса доведения сообщения по рассматриваемому варианту показывает, что в нем можно выделить состояния:

S_0 – ЗвО выдало 1-й повтор П;

S_1 – ЗвП №1 получило 1-й повтор П и выдало повтор Кв;

S_2 – ЗвП №2 получило 1-й повтор П и выдало повтор Кв;

S_3 – ЗвП №1 и ЗвП №2 получили 1-й повтор П и выдали повтор Кв;

S_4 – П доведен до ЗвП №1, ЗвО выдало 2-й повтор П;

S_5 – П доведен до ЗвП №1, ЗвП №2 получило 2-й повтор Па и выдало повтор Кв;

S_6 – П доведен до ЗвП №2, ЗвО выдало 2-й повтор П;

S_7 – П доведен до ЗвП №2, ЗвП №1 получило 2-й повтор П и выдало повтор Кв;

S_8 – П не доведен после первого повтора до ЗвП №1 и ЗвП №2, ЗвО выдало 2-й повтор П;

S_9 – П не доведен после первого повтора до ЗвП №1 и ЗвП №2, ЗвП №1 получило 2-й повтор П и выдало повтор Кв;

S_{10} – П не доведен после первого повтора до ЗвП №1 и ЗвП №2, ЗвП №2 получило 2-й повтор П и выдало повтор Кв;

S_{11} – П не доведен после первого повтора до ЗвП №1 и ЗвП №2, ЗвП №1 и ЗвП №2 получили 2-й повтор пакета и выдали повтор квитанции.

Следует отметить, что рассматриваемый процесс имеет четыре поглощающих состояния, одно из которых (S_{12}) соответствует факту недоведения П ни до одного из ЗвП, другое (S_{15}) соответствует факту доведения П до двух ЗвП, а состояния (S_{13},S_{14}) – доведению пакета сообщения только до ЗвП №1 или ЗвП №2 соответственно.

Вообще, для описания рассматриваемого процесса ИО при конечном числе повторов пакетов сообщения, характерно увеличение количества поглощающих состояний с ростом числа ЗвП в БС иерархической СПД. Из логики рассуждений следует, что их число будет определяться выражением

$$N_{ПС} = 2 + C^1_{N_{ЗвП}} + C^2_{N_{ЗвП}} + \ldots + C^{N_{ЗвП}-1}_{N_{ЗвП}} = 2 + \sum_{i=1}^{N_{ЗвП}-1} C^i_{N_{ЗвП}}, \quad (2)$$

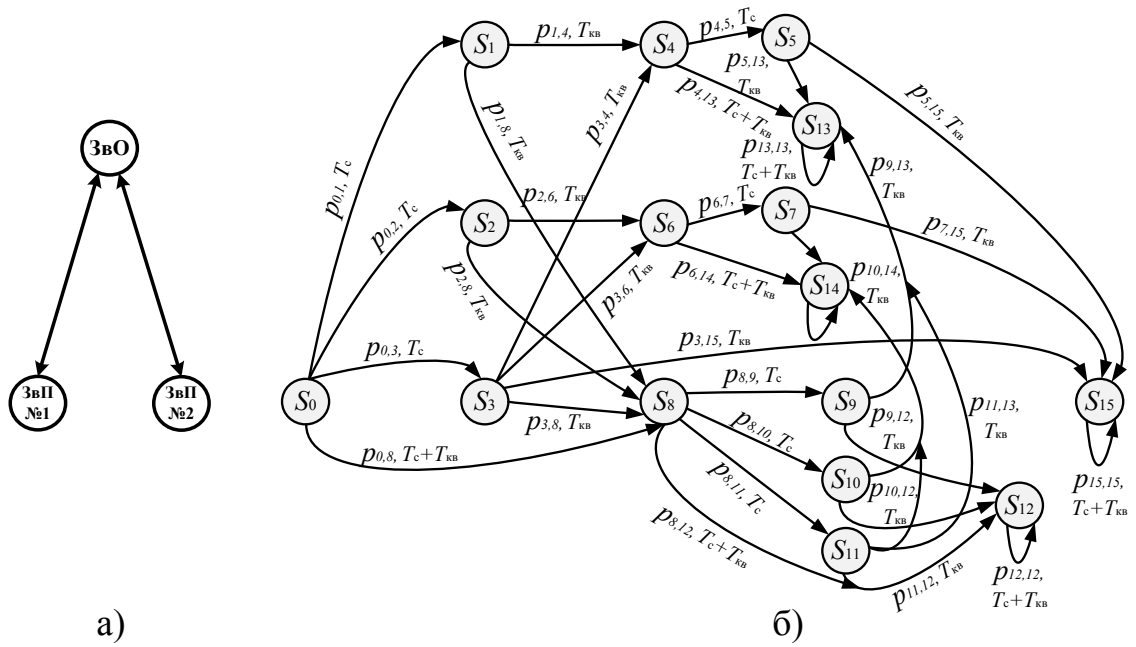


Рис. 2. Структура базового сегмента и графы ее КМЦ: а – структура БС; б – граф состояний и переходов поглощающей КМЦ

где $N_{ПС}$ – количество поглощающих состояний КМЦ;

$N_{ЗвП}$ – количество ЗвП в БС;

$C_n^m = \dfrac{n!}{m!(n-m)!}$ – число сочетаний из n по m.

Граф состояний и переходов (ГСП) поглощающей КМЦ, описывающей рассматриваемый процесс доведения пакета сообщения представлен на *рисунке 2(б)*.

Однако ГСП КМЦ, представленный на *рисунке 2(б)*, недостаточно корректно отображает анализируемый процесс доведения пакета сообщения. Действительно, из физики анализируемого процесса ясно, что в нем имеются переходы с шагом, равным либо времени передачи П (T_c), либо времени передачи Кв ($T_{кв}$) (исключая переход из поглощающего состояния само в себя, шаг которого может быть произвольным). Кроме того, при расчете ВВХ путем пошагового решения уравнения Колмогорова-Чепмена (УКЧ)

$$P_{<D>}^{(l)} = P_{<D>}^{(l-1)} \cdot P_{[D,D]}\ , \qquad (3)$$

где $P_{<D>}^{(l)}$, $P_{<D>}^{(l-1)}$ – векторы вероятностей состояния КМЦ на l-м и $(l-1)$-м шагах процесса ИО;

D – число состояний процесса доставки П;

$P_{[D,D]}$ – матрица переходных вероятностей (МПВ) КМЦ, с учетом метода среднего шага переходов, предложенного Цимбалом В.А. [3], возникают коллизии, вызванные некорректным учетом времени переходов ($T_c+T_{кв}$) $S_0 \to S_8$, $S_4 \to S_{13}$, $S_6 \to S_{14}$, $S_8 \to S_{11}$. Характер таких некорректностей показан на *рисунке 3(а)* на примере расчета ВВХ для рассматриваемого БС при исходных данных (ИД), представленных в *таблице 1*.

Полученные зависимости имеют отмеченные стрелкой (*рисунок 3(а)*) «скачки» значений вероятности доведения сообщения, не обусловленные физикой исследуемого процесса. Для случая трех повторов П и одном повторе Кв ситуация аналогична (*рисунок 3(б)*).

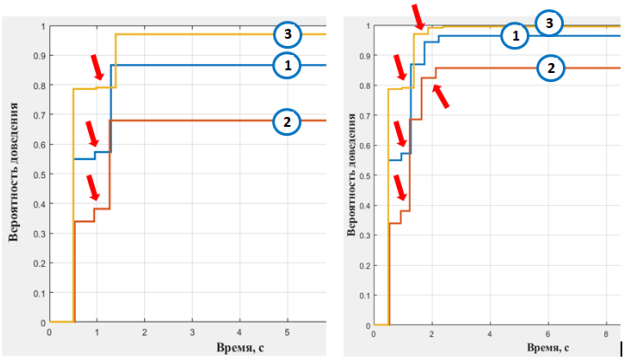
Для исключения изложенных некорректностей предлагается в рассматриваемый ГСП КМЦ ввести дополнительные фиктивные состояния (ФС). Состояние КМЦ S_i называется *фиктивным*, если оно является невозвратным и не поглощающим и имеется только один переход из состояния S_i только в состояние S_j, вероятность которого $p_{ij}=1$ [9,10].

Тогда модифицированный граф состояний и переходов КМЦ, примет вид, представленный на *рисунке 4*, где S_4, S_7, S_{10}, S_{15} – ФС. Семантика состояний S_0–S_3 в нем та же, что и в ГСП на *рисунке 2(б)*. Семантика состояния S_4 такова: сообщение не принято звеньями-получателями №1 и №2 после первого повтора за интервал T_c. Через интервал времени, равный $T_{кв}$, ЗвО повторит передачу П, поэтому переходная вероятность

Таблица 1

ИД для расчета ВВХ доставки П в БС «ЗвО – два ЗвП»

Показатель		Значение		
		вариант 1	вариант 2	вариант 3
Размер пакета сообщения (L_c), бит		480	480	480
Размер квитанции ($L_{кв}$), бит		120	120	120
Пропускная способность каналов ПД (V), бит/с		1200	1200	1200
Вероятность битовой ошибки в канале ПД (p_0)	ЗвО – ЗвП №1	$4 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
	ЗвО – ЗвП №2	$6 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4}$



а) б)

Рис. 3. Зависимости вероятности доведения П от времени для БС, состоящего из ЗвО и двух ЗвП при: а) двух повторах П и одном повторе Кв в протоколе ИО; б) трех повторах П и одном повторе Кв в протоколе ИО

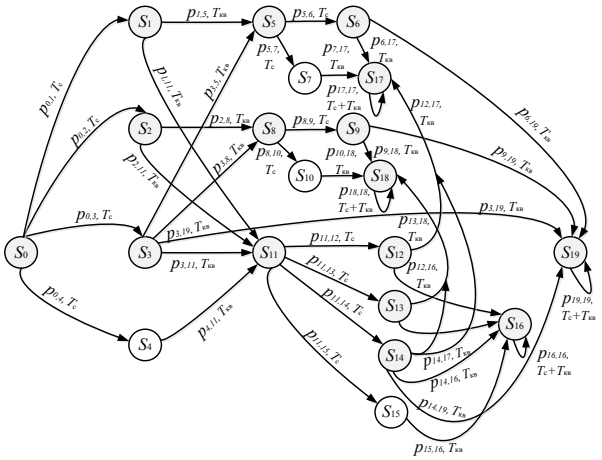


Рис. 4. Модифицированный ГСП с КМЦ с фиктивными состояниями

$p_{4,11}=1$. Состояние S_{15} аналогично S_4. Состояния S_7 и S_{10} характеризуются как: при втором повторе П ЗвП №2 (ЗвП №1) не получило П за интервал T_c. Через интервал $T_{кв}$ процесс перейдет в состояние «пакет доведен только до ЗвП №1 (ЗвП №2)». Состояния S_{16}–S_{19} соответствуют состояниям S_{12}–S_{15}, а S_{11}–S_{14} соответствуют S_8–S_{11} на *рисунке 2(б)*.

Изложенный подход позволяет получить в ГСП КМЦ только два шага переходов: передача П продолжительностью T_c и передача Кв продолжительностью $T_{кв}$, времена которых определяются по выражениям:

$$T_c = \frac{L_c}{V}; \quad T_{кв} = \frac{L_{кв}}{V}. \qquad (4)$$

МПВ для КМЦ, представленной графом состояний и переходов на *рисунке 4*, имеет вид:

$$P_{[20,20]} = \begin{Vmatrix}
0 & p_{i1}q_{i2} & q_{i1}p_{i2} & p_{i1}p_{i2} & q_{i1}q_{i2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{éd1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_{éd1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{éd2} & 0 & 0 & q_{éd2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{éd1}q_{éd2} & 0 & 0 & q_{éd1}p_{éd2} & 0 & 0 & q_{éd1}q_{éd2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{éd1}p_{éd2} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{i2} & q_{i2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_{éd2} & 0 & p_{éd2} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{i1} & q_{i1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_{éd1} & p_{éd1} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{i1}q_{i2} & q_{i1}p_{i2} & p_{i1}p_{i2} & q_{i1}q_{i2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_{éd1} & p_{éd1} & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_{éd2} & 0 & p_{éd2} & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_{éd1}q_{éd2} & p_{éd1}q_{éd2} & q_{éd1}p_{éd2} & p_{éd1}p_{éd2} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1
\end{Vmatrix}$$

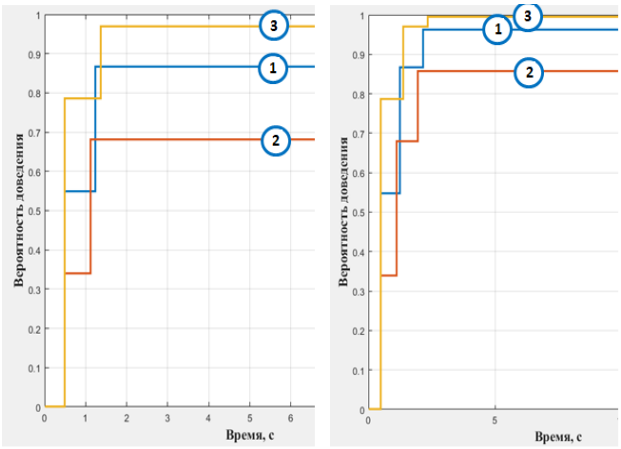
Переходными вероятностями МПВ являются вероятности доведения (недоведения) до ЗвП№1 и ЗвП№2 пакета (p_{c1},q_{c1},p_{c2},q_{c2}) и Кв ($p_{кв1}$,$q_{кв1}$,$p_{кв2}$,$q_{кв2}$) на него за один повтор:

$$p_c = (1-p_0)^{L_c}; \quad q_c = 1 - p_c; \qquad (5)$$

$$p_{кв} = (1-p_0)^{L_{кв}}; \quad q_{кв} = 1 - p_{кв}, \qquad (6)$$

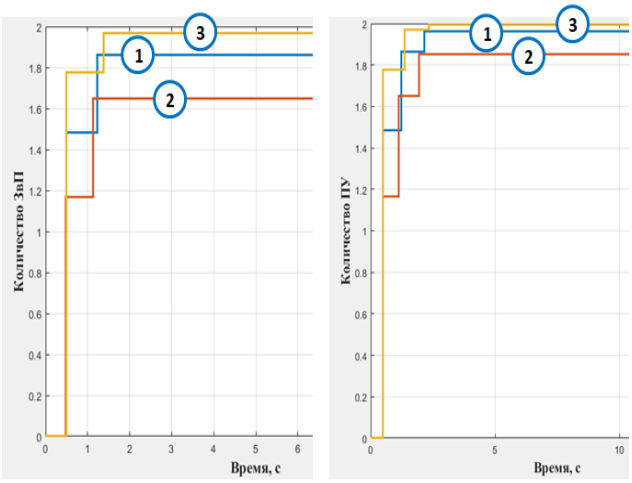
а также вероятности переходов из фиктивных и поглощающих состояний, равные 1.

Зависимости вероятности доведения П от времени для рассматриваемого БС, при ИД, представленных в *таблице 1*, полученные с использованием изложенного выше способа представлены на *рисунке 5*. Из анализа этих зависимостей следует, что применение дополнительных ФС в марковской модели ИО в БС иерархической СПД при различном качестве каналов



а) б)

Рис. 5. Зависимости вероятности доведения П от времени для БС, состоящего из ЗвО и двух ЗвП при:
а) двух повторах П и одном повторе Кв в протоколе ИО;
б) трех повторах П и одном повторе Кв в протоколе ИО



а) б)

Рис. 6. Зависимости математического ожидания числа ЗвП, получивших пакет сообщения П от времени

ПД позволяет избавиться от изложенных выше некорректностей и получить значения ВВХ доведения сообщений, соответствующие физике исследуемого процесса. Количество дополнительных ФС в рассматриваемых марковских моделях ИО будет зависеть от количества ЗвП в БС ($N_{ЗвП}$) и числа повторов П в протоколе ИО.

При оценке эффективности ИО в СПД важно знать количество ЗУ, получивших сообщение в процессе его доставки. Такую динамику для рассматриваемого процесса отражают представленные на *рисунке 6* зависимости математического ожидания числа ЗвП в рассматриваемом БС, получивших П, от времени при ИД, приведенных в *таблице 1*.

Из изложенного следует, что особенностями марковского моделирования ИО в БС иерархической СПД при различном качестве каналов ПД являются следующие обстоятельства:

- граф состояний и переходов КМЦ процесса не содержит переходов из выбранного состояния «само в себя» (за исключением поглощающих состояний);
- количество поглощающих состояний КМЦ отличается от классической ПКМЦ (два поглощающих состояния) и определяется выражением (2);
- использование дополнительных фиктивных состояний при моделировании процесса ИО в рамках теории КМЦ позволяет получить значения ВВХ доведения сообщений, соответствующие физике исследуемого процесса. Количество дополнительных ФС зависит от количества ЗвП в БС и числа повторов пакетов сообщения в протоколе ИО.

Заключение

В настоящей работе с использованием математического аппарата конечных марковских цепей на примере базовой подсети СПД (одно ЗвО и два ЗвП) исследован вопрос определения вероятностно-временных характеристик доставки пакетов сообщений в БС радиально-узловой сети передачи данных при различном качестве каналов ПД.

Изложенный подход позволяет определить зависимость вероятности доведения сообщений от времени для многозвенных СПД при различных характеристиках каналов передачи данных и может быть обобщен для любого конечного количества ЗУ-получателей.

Литература

1. Суздалев А.В. Сети передачи информации АСУ. М.: Радио и связь, 1983. 152 с.
2. 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.
3. Цимбал В.А. Информационный обмен в сетях передачи данных. М.: Вузовская книга, 2014. 144 с.
4. ГОСТ 34.954-91. Информационная технология. Взаимосвязь открытых систем. Использование протокола пакетного уровня X.25 для обеспечения услуг сетевого уровня взаимосвязи открытых систем в режиме с установлением соединения. М.: Издательство стандартов, 1992. 71 с.
5. Цимбал В.А., Штефан В.И., Кабанович С.Г. Применение конечных марковских цепей для анализа характеристик процесса доведения сообщений в иерархических информационных сетях передачи данных // Машиностроитель, 2001. №12. С. 18-19.
6. Аничкин С.А., Белов С.А., Бернштейн А.В. и др. Протоколы информационно-вычислительных сетей: Справочник. М.: Радио и связь, 1990. 504 с.
7. Цимбал В.А., Игумнов В.В., Хвостунов Ю.С. Корректная математическая модель доведения сообщений по протоколу HDLC в вариантах «точка-многоточка» // Инфокоммуникационные технологии, 2007. Т.5. №3. С. 61-62.
8. Цимбал В.А., Косарева Л.Н., Ковалев С.В. Нахождение характеристик доведения сообщений по протоколу HDLC в вариантах «точка-многоточка». М., 2001. Т.2. С.362-365.
9. Москвин А.А. Правила синтеза матриц переходных вероятностей и шагов перехода конечной марковской цепи для процесса информационного обмена в соединениях типа «точка-точка» // Сборник трудов XL Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем». г. Серпухов, 2021. Ч.3. С.162-172.
10. Попов М.Ю., Якимова И.А., Панченко С.А. Нахождение характеристик конечных марковских цепей на основе метода фиктивных состояний и его приложение к анализу процесса передачи данных / Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2012. №3(7). С.69-72.

УДК 623.618

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РЕКОНФИГУРАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ЦХОИ АСУ СН ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ИХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR RECONFIGURATION OF TECHNICAL MEANS OF THE ISPC OF ACS SP TO ENSURE THE STABILITY OF THEIR OPERATION UNDER THE INFLUENCE OF DESTABILIZING FACTORS

Владимир Анатольевич Цимбал
заслуженный деятель науки РФ
доктор технических наук, профессор
профессор кафедры
«Автоматизированные системы управления»
филиал ВА РВСН им. Петра Великого
(г. Серпухов)
ведущий научный сотрудник МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел.:+7 (985) 141-79-09
E-mail: tsimbalva@mail.ru

Александр Сергеевич Стрельчук
аспирант
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7 (4967) 35-31-93

Аннотация

Устойчивость функционирования автоматизированных систем управления специального назначения (АСУ СН) к действию дестабилизирующих факторов в значительной степени зависит от результата размещения информационных ресурсов, а также от качества управления информационными процессами в ходе их эксплуатации. Практическое решение вопросов оптимизации распределения (перераспределения) информационных ресурсов, а также управление данным распределением в АСУ СН связано с развитием теории дискретной оптимизации. Большая размерность, дискретность и нелинейность указанных задач, необходимость их решения в жестких временных рамках (на этапах эксплуатации и совершенствования) порождает задачу многомерности, дискретности и поиска путей снижения размерности сформулированных задач и разработки эффективных методов их решения. В связи с этим актуальной задачей, рассматриваемой в настоящей статье, является разработка методики реконфигурации технических средств центров хранения и обработки информации (ЦХОИ) в целях обеспечения устойчивости их функционирования при воздействии на АСУ СН дестабилизирующих факторов.

Ключевые слова: автоматизированные систем управления специального назначения, устойчивость функционирования, методика реконфигурации, информационные массивы, центр хранения и обработки информации, обеспечение сохранности информации, элемент программного обеспечения.

Summary

The stability of the functioning of automated control systems for special purposes (ACS SP) to the action of destabilizing factors largely depends on the result of the placement of information resources, as well as on the quality of management of information processes during their operation. The practical solution of the issues of optimizing the distribution (redistribution) of information resources, as well as the management of this distribution in the automated control system is associated with the development of the theory of discrete optimization. The large dimensionality, discreteness and nonlinearity of these tasks, the need to solve them in a tight time frame (at the stages of operation and improvement) generates the task of multidimensionality, discreteness and finding ways to reduce the dimensionality of the formulated tasks and develop effective methods for solving them. In this regard, an urgent task considered in this article is the development of a methodology for reconfiguring the technical means of information storage and processing centers (ISPC) in order to ensure the stability of their functioning under the influence of destabilizing factors on the automated control system.

Keywords: automated control systems for special purposes, stability of functioning, reconfiguration methodology, information arrays, information storage and processing center, information security, software element.

Введение

В современных условиях геополитического противостояния Российской Федерации и стран НАТО важное значение отводится реализации концепции обеспечения информационного превосходства над потенциальным противником. Практическая реализация этой концепции позволит военным формированиям МО РФ различного уровня путем оперативного сбора, обработки и передачи управленческой информации значительно упредить противника в оценке быстроменяющейся обстановки и принятии эффективных решений по достижению поставленных целей, выполняемых задач по обеспечению боевых действий. Важнейшую роль в достижении такого превосходства отводится широкому применению современных и перспективных математических методов, методик и моделей, технических, программных и технологических средств, которые должны составить основу создания новых поколений автоматизированных систем управления специального назначения (АСУ СН).

Обоснование структуры задачи разработки методики реконфигурации технических средств ЦХОИ в целях обеспечения устойчивости их функционирования при воздействии на АСУ СН дестабилизирующих факторов

Устойчивость функционирования АСУ СН к действию дестабилизирующих факторов в значительной степени зависит от результата размещения информационных ресурсов, а также от качества управления информационными процессами в ходе эксплуатации АСУ СН. При этом под устойчивостью функционирования системы понимается ее способность выполнять возложенные функции с заданными показателями качества в условиях воздействия дестабилизирующих факторов [10]. В отличие от надежности термин устойчивость подразумевает обеспечение требуемых значений показателей эффективности системы в условиях возможной ее реконфигурации (изменения ее структуры) [11].

Решение указанной задачи тесно связано с результатами как анализа, так и синтеза системы хранения и обработки информации (СХОИ) АСУ СН. Такой синтез с учетом выбора топологии сети передачи данных и распределения информационных ресурсов АСУ СН в ее узлах приводит к модели настолько большой размерности, что при существующем уровне развития математических методов и вычислительной техники представляет значительные трудности.

Реализация данных мероприятий подразумевает выполнение такого плана построения информационных процессов, который обеспечивает на существующих средствах хранения и обработки информации поддержание функциональных характеристик АСУ СН в целом без реструктуризации технической составляющей системы и каналов связи в случае воздействия на систему дестабилизирующих факторов. Соответственно, последовательное решение оптимизационных задач обеспечит как первоначальное определение, так и уточнение результатов распределения информационных массивов АСУ СН в системе хранения и обработки информации практически на всех этапах жизненного цикла АСУ СН [9].

В связи с тем, что на практике совместно с элементами информационных систем (базами данных) хранятся большие объемы внешнего по отношению к базе данных контента (электронные образы документов, файлы эксплуатационно-технической документации, мультимедиа-файлы и т.п.), целесообразно в качестве элементов информационных систем рассматривать информационные массивы (ИМ).

В общем случае можно утверждать, что устойчивость функционирования АСУ СН непосредственно зависит от устойчивости процессов хранения и обработки информации. Для повышения устойчивости ЦХОИ (центры хранения и обработки информации) на этапе проектирования и эксплуатации АСУ СН целесообразно рациональное распределение элементов программного обеспечения и информационных массивов по узлам системы хранения и обработки информации, а при воздействии дестабилизирующих факторов, в случае структурной деградации системы – их перераспределение [7].

Решение задач организации информационных процессов ЦХОИ позволяет повысить эффективность функционирования АСУ СН за счет снижения издержек, связанных с разрушением информации, включая потери от невозможности решения задач и получения недостоверных выходных результатов, за счет уменьшения времени и затрат на восстановление разрушенной или искаженной информации, рационального использования внешней памяти вычислительных средств для размещения элементов АСУ СН и т.д. [8].

Практическое решение вопросов оптимизации распределения (перераспределения) информационных ресурсов, а также управление данным распределением в АСУ СН связано с развитием теории дискретной оптимизации. Большая размерность, дискретность и нелинейность указанных задач, необходимость их ре-

шения в жестких временных рамках (на этапах эксплуатации и совершенствования) порождает задачу многомерности, дискретности и поиска путей снижения размерности сформулированных задач и разработки эффективных методов их решения [8].

Решаемые задачи обеспечения устойчивости функционирования АСУ СН являются достаточно сложными, поэтому традиционные методы дискретной оптимизации имеют экспоненциальную зависимость времени решения задач от их размерности [1,2].

В случае жестких временных ограничений необходимо получение рационального (квазиоптимального) решения задач управления информационными процессами, качество которого находится в прямой зависимости от значения временных ограничений.

Таким образом, в ходе исследований в целях обеспечения устойчивости функционирования АСУ СН, на первом этапе должны быть решены следующие частные задачи [4-6]:

1. Необходимо разработать математические модели определения числа и местоположения центров обработки и хранения информации в СХОИ; оптимизации состава комплекса средств хранения данных; оптимизации распределения элементов программного обеспечения функциональных задач по узлам системы хранения и обработки информации.

2. Необходимо разработать математические модели оптимизации распределения информационных массивов по центрам хранения и обработки информации.

3. Необходимо разработать математические модели определения рационального уровня расходов на формирование комплекса средств хранения данных в центрах хранения и обработки информации; оптимизации распределения резерва информационных ресурсов по центрам хранения и обработки данных.

4. Необходимо осуществить выбор методов решения задач защиты информации СХОИ.

5. Необходимо выполнить экспериментальную проверку работоспособности и эффективности разработанных математических моделей, методов и алгоритмов защиты информации СХОИ.

6. Необходимо разработать методику применения методов решения задач обеспечения устойчивости функционирования АСУ СН [8].

Для обеспечения построения планов реконфигурирования АСУ СН в результате воздействия дестабилизирующих факторов требуется разработать методику применения математических моделей в условиях структурной деградации системы хранения и обработки данных.

Обоснованность принятых решений должна быть подтверждена путем проведения экспериментальной проверки работоспособности и эффективности разработанных математических моделей, методов и алгоритмов комплекса математических моделей защиты информации ЦХОИ.

С учетом результатов экспериментальной проверки разработанных математических моделей и алгоритмов управления информационными процессами, а также оценки возможности их практического использования, должна быть разработана методика применения методов решения задач обеспечения устойчивости функционирования на различных этапах жизненного цикла АСУ СН.

Разработка математических моделей и алгоритмов оптимизации состава комплекса технических средств хранения и обработки данных

Аппаратурную основу центров хранения и обработки информации (ЦХОИ) АСУ СН составляют технические средства хранения и обработки данных. Допустим все средства хранения данных, претенденты на включение в состав комплекса технических средств ЦХОИ, делятся на I групп. В каждую i-ю группу средств хранения входит Z_i средств хранения, имеющих номера с 1 по Z_i. Заданы стоимость $C_i(z_i)$, время восстановления работоспособности $T_i^B(z_i)$, параметры надежности $K_{r_i}(z_i)$ и объем информационного пространства $V_i(z_i)$ каждого средства хранения данных.

Тогда по критерию максимума значения коэффициента готовности системы хранения данных в целом задача оптимизации состава средств хранения может быть сформулирована следующим образом [4,12]. Найти значения переменных z (i=1,2, … I), такие что:

$$\prod_{i=1}^{I} K_{r_i}(z_i) \to \max \qquad (1)$$

при ограничениях:

- на стоимость системы резервирования:

$$\sum_{i=1}^{I} C_i(z_i) \le C^{Доп} \qquad (2)$$

- на время восстановления системы резервирования:

$$\sum_{i=1}^{I} T_i^B(z_i) \le T^{B\ Доп} \qquad (3)$$

- на общий объем средств хранения:

$$\sum_{i=1}^{I} V_i(z_i) \le V_i^{Доп} \qquad (4)$$

- на значения переменных

$$z_i = 0,1,2,\ldots,Z_i \qquad (5)$$

где $C^{Доп}$ – максимально допустимая стоимость системы хранения и резервирования;

$T^{В\ Доп}$ – максимально допустимое время восстановления системы хранения и резервирования в случае холодного запуска при заполненных носителях и информации;
$V_i^{Доп}$ – минимально допустимый объем системы хранения и резервирования данных.

Задача (1)-(5) относится к классу задач выбора комплекса технических средств, и для ее решения применяются методы динамического программирования [1].

Однако задача (1)-(5) путем логарифмирования целевой функции может быть преобразована к следующему виду:

$$\sum_{i=1}^{Iобщ} x_i \ln K_{r_i} \to \max \qquad (6)$$

при ограничениях:

- на стоимость системы хранения:

$$\sum_{i=1}^{Iобщ} C_i x_i \le C^{Доп} \qquad (7)$$

- на время восстановления системы резервирования:

$$\sum_{i=1}^{Iобщ} T_i^B(x_i) \le T^{B\ Доп} \qquad (8)$$

- на общий объем средств хранения:

$$\sum_{i=1}^{Iобщ} V_i x_i \le V_i^{Доп} \qquad (9)$$

- на значения переменных:

$$x_i = \{0,1\}, \sum_{i \in L_j} x_i \le 1, j = 1,2,...,\sum_{k=1}^{I} Z_k \qquad (10)$$

где x_i – значения переменных в целевой функции, $x_i=1$, если i-ое средство включено в комплекс и 0 – в противном случае;
$I_{общ}$ – общее число средств хранения информации – претендентов на включение в состав комплекса,
L_j – множество номеров средств хранения информации j-го вида.

Задача (6) – (10) относится к классу задач целочисленного линейного программирования с булевыми переменными и для ее решения могут быть использованы существующие методы дискретной оптимизации [1].

Разработка математической модели оптимизации распределения элементов программного обеспечения функциональных задач по узлам системы хранения и обработки данных (СХОД)

В качестве элементов программного обеспечения (ЭПО) будем рассматривать программные комплексы, программные модули, осуществляющие решение функциональных задач с использованием информационных массивов (баз данных) в АСУ СН.

Для простоты дальнейших рассуждений примем следующее допущение – время получения информации из информационного массива равно 0 [4].

То есть, оперативность получения данных для решения задач не зависит от результатов размещения информационных массивов и эффективности процессов обработки информации в местах их расположения.

Пусть задана распределенная информационная система хранения и обработки данных, состоящая из L вычислительных комплексов.

В СХОД решается K задач. Для каждого j-го узла СХОД сформирован и определен перечень задач, решение которых разрешено должностным лицам. Решение каждой из задач связано с формированием и обработкой соответствующего числа запросов на получение (сохранение, изменение) данных из (в) информационных массивов (ах).

Размещение ЭПО по узлам СХОД определяется планом распределения, задаваемым матрицей

$$\Phi = \left\| \varphi_{k\,j} \right\|, \qquad (11)$$

где

$$\Phi_{k\,j} = \begin{cases} 1, если\ k-й\ ЭПО\ размещается\ на\ j-м\ узле\ сети, \\ 0, в\ противном\ случае \end{cases}$$

Тогда, выражения для определения вероятности успешного решения P_{jk}, времени решения задач $T_{jk}^{реш}$, объема информации, передаваемой по каналам связи при решении каждой задачи на каждом вычислительном комплексе (узле СХОД) $\Lambda_{jk}(j=1,2,\ldots,L;\ k=1,2,\ldots,K)$ имеют вид [4,5]:

$$P_{jk} = \tau_{jk} \sum_{I=1}^{L} \varphi_{kl} P_{jkl}^{n}$$

$$T_{jk}^{реш} = \sum_{I=1}^{L} \varphi_{kl} (T_{jlk} + t_{jk}^{реш})$$

$$\Lambda_{jk} = \lambda_{jk} \left[\sum_{I=1}^{L} \left\{ \left(F_{ji} l_{jk}^{3} + F_{ji} l_{jk}^{0} \right) \varphi_{ki} \right\} \right],$$

где P_{jik}^{n} – вероятность успешной передачи информации между узлами j и i при решении на j-м вычислительном комплексе k-й задачи

$$P_{jik}^{n} = P_{jik}^{3} P_{jik}^{C},$$

где P_{jik}^{3}, P_{jik}^{C} – вероятности успешной передачи запроса (сообщения) на решение и сообщения с результатом решения должностным лицом j-го узла СХОД k-й задачи в i-м узле СХОД соответственно;

F_{ij} – среднее число информационных сообщений, пересылаемых при передаче из i-го узла сети в j-й;

T_{ijk} – среднее время передачи сообщения из i-го узла СХОД в j-й при решении k-й задачи должностным лицом j-го вычислительного комплекса

$$T_{ijk} = T_{jik}^{3} + T_{ijk}^{C}$$

T_{jik}^{3}, T_{ijk}^{C} – среднее время передачи запроса на решение и сообщения, содержащего результаты решения должностным лицом j-го вычисли-

тельного комплекса k-й задачи в i-м узле СХОД соответственно;

$t_{jkl}^{реш}$ – время выполнения k-го ЭПО на l-м вычислительном комплексе должностным лицом j-го узла при наличии всех исходных данных;

$\tau_{jk}=1$ – если должностные лица j-го вычислительного комплекса решают k-ю задачу;

$\tau_{jk}=0$ – в противном случае;

λ_{jk} – интенсивность решения k-й задачи должностными лицами j-го вычислительного комплекса;

$l_{jk}^{З}$ – объем запроса, формируемого должностными лицами j-го вычислительного комплекса на решение k-й задачи;

l_{jk}^{C} - объем сообщения с результатами решения должностными лицами j-го вычислительного комплекса k-й задачи;

u_k – объем внешней памяти, занимаемый k-м ЭПО.

С использованием данных выражений задача распределения ЭПО по критерию минимума объема информации, передаваемой по каналам связи при выполнении в РИС всех ЭПО (при решении всех функциональных задач) может быть сформулирована следующим образом [4,5,6]. Определить значения $\varphi_{kj}(k=1,2,\ldots,K;\ j=1,2,\ldots,L)$ такие, что

$$\Lambda=\min\sum_{j=1}^{L}\sum_{k=1}^{K}\Lambda_{jk}(\varphi) \qquad (12)$$

при ограничениях:

а) на среднее время решения задач

$$T_{jk}^{реш}\le T_{jk}^{доп},\ j=1,2,\ldots,L;k=1,2,\ldots,K \qquad (13)$$

б) на вероятность решения задач

$$P_{jk}\ge P_{jk}^{доп},\ j=1,2,\ldots,L;k=1,2,\ldots,K \qquad (14)$$

в) на объем пространства среды хранения ЭПО

$$\sum_{k=1}^{K}\varphi_{kj}u_k\le V_j,(j=1,2,\ldots,L) \qquad (15)$$

г) на значения переменных

$$\sum_{j=1}^{L}\varphi_{kj}=1,(k=1,2,\ldots,K) \qquad (16)$$

$$\varphi_{kj}=\{0,1\},k=1,2,\ldots,K;j=1,2,\ldots,L; \qquad (17)$$

Задача (12)-(17) относится к классу линейных задач дискретного программирования с булевыми переменными, для ее решения могут быть использованы существующие методы дискретной оптимизации [1].

Разработка математической модели оптимизации распределения информационных массивов по центрам хранения и обработки информации

Необходимо распределить информационные массивы по ЦХОИ таким образом, чтобы минимизировать время решения всех задач в распределенной информационной системе (РИС).

Это обеспечит снижение нагрузки на каналы передачи данных, что в свою очередь позволит иметь как резервы пропускной способности каналов на случай реконфигурации РИС, так и снижение зависимости процесса решения задач от их состояния.

В качестве информационного массива может рассматриваться база данных, массив электронных образов документов, обрабатываемых и циркулирующих в системе, и т.п.

Для простоты дальнейших выводов введем следующие допущения [5,6]:

1. Информационный обмен между ЭПО при решении задач осуществляется посредством сохранения промежуточных и конечных результатов в информационные массивы.

2. Время выполнения запросов к информационным массивам пренебрежительно мало по сравнению со временем передачи информации по каналам связи.

Введем следующие обозначения:

M – количество информационных массивов;

$\|\varphi_{lj}\|$ – матрица распределения ЭПО по узлам СХОД (l=1,2,…,K, j=1,2,…,L);

$\varphi_{lj}=\{0,1\}$; $\|\omega_{lm}\|=1$ – матрица связи ЭПО и информационных массивов (l=1,2,…,K, m=1,2,…,M);

$\omega_{lm}=1$ – если l-й ЭПО имеет информационный обмен в процессе своего решения с m-м информационным массивом и 0 – в противном случае;

$\|\psi_{mj}\|$ – матрица распределения информационных массивов;

$(m=1,2,\ldots,M,\ j\in X_p)$ L_{lm} – среднее значение суммарного объема информационного обмена l-го ЭПО при его выполнении с m-м информационным массивом;

$l_э$ – длина эталонного сообщения;

$t_{ij}^{э}$ – среднее время доведения эталонного сообщения от i-го узла СХОД к j-му;

t_{ij}^{p} – среднее время выполнения l-го ЭПО в j-м узле без учета информационного обмена с информационными массивами;

X_p – множество номеров узлов СХОД, в которых создаются ЦХОИ (результат решения задачи (18)-(21).

Тогда задача оптимизации распределения информационных массивов по критерию минимума среднего времени решения всех задач в РИС УП может быть сформулирована следующим образом [4,5].

Определить такие значения,

$$\psi_{lm},\ l=1,2,\ldots,M,m\in X_p$$

что

$$T=\min\sum_{j=1}^{L}\sum_{k=1}^{K}\varphi_{kj}(t_{kj}^{p}+\sum_{l=1}^{M}\omega_{kl}\frac{L_{ki}}{l_Э}\sum_{m\in X_p}\psi_{lm}t_{jm}^{Э}) \qquad (18)$$

при ограничениях:

- на объем пространства на носителях для хранения информационных массивов

$$\sum_{l=1}^{M}\psi_{li}u_l \le V_j, j \in X_p \qquad (19)$$

- на значения переменных

$$\sum j \in X_p \psi_{li} = 1, \forall l \qquad (20)$$

$$\psi_{li} = \{0,1\}, \qquad (21)$$

где u_l – объем l-го информационного массива.

Данная задача относится к классу задач целочисленного линейного программирования с булевыми переменными [1,2,3]. Для ее решения могут быть использованы существующие методы дискретной оптимизации [1].

Разработка математической модели оптимизации распределения резерва информационных ресурсов по центрам хранения и обработки данных

Пусть N – число ЦХОИ, создаваемых в системе, M – число информационных массивов, хранящихся и обрабатываемых в ЦХОИ. Известно распределение ИМ по ЦХОИ, задаваемое матрицей

$$\|\psi_{ij}\|, i = 1,2,...,M; j = 1,2,...,N,$$

пропускные способности каналов передачи данных между каждыми l-м и m-м ЦХОИ – v_{lm}. Тогда можно определить значение среднего времени восстановления i-го ИМ в случае его искажения или разрушения [5,6]

$$T_i^B = \sum_{l=1}^{N}\psi_{li}\sum_{m=1}^{N}y_{im}(\frac{u_i}{v_{lm}} + t_{il}^p),$$

где t_{il}^p – время выполнения работ по развертыванию и подключению (регламентных работ) i-го ИМ после его восстановления в l-м ЦХОИ;

$\|y_{ij}\|, i = 1,2,...,M; j = 1,2,...,N$ – матрица распределения резерва ИМ по ЦХОИ, причем

$$y_{ij} = \{0,1\}, \sum_{j=1}^{N}y_{ij} = 1, i = 1,2,...,M; \psi_{ij}y_{ij} = 0 \forall i, j$$

Для каждого i-го ИМ в АСУ СН общее время эксплуатации в общем случае составляет

$$T_i^Э = T_i^p + T_i^B,$$

где T_i^p – среднее время штатной эксплуатации ИМ за время $T_i^Ý$

Тогда для i-го ИМ коэффициент готовности составит

$$K_{Гi} = \frac{T_i^p}{T_i^p + T_i^B}$$

Обозначим через R_g множество номеров ИМ, которые распределены в g-й ЦХОИ, g=1,2,…,N. Тогда время восстановления ИМ в g-м ЦХОИ будет составлять величину

$$\overline{T}_g^B = \sum_{r_g \in R_g} T_{r_g}^B$$

Общее время восстановления работоспособности РИС в этом случае составит

$$T^B = \max_g \overline{T}_g^B$$

Целью построения АСУ СН с учетом мероприятий по обеспечению устойчивости функционирования является получения такого варианта, при котором общий коэффициент готовности ИМ, составляющих РИС, имел бы максимально возможное значение, то есть

$$K_Г \to \max$$

Получить данный вариант построения РИС УП возможно при выполнении условия

$$T_i^B \to \min, i = 1,2,...,M$$

В этом случае задача распределения резерва ИМ по ЦХОИ по критерию минимума общего значения среднего времени восстановления информации в РИС УП может быть сформулирована следующим образом [5]. Определить такие значения

$$\|y_{ij}\|, i = 1,2,...,M; j = 1,2,...,N,$$

что

$$\sum_{i=1}^{M}\sum_{l=1}^{N}\psi_{il}\sum_{j=1}^{N}y_{il}(\frac{u_i}{v_{li}} + t_{il}^p) \to \min \qquad (22)$$

при ограничениях

- на стоимость хранения резерва ИМ

$$\sum_{j=1}^{N}C_j\sum_{i=1}^{M}y_{il}\left]\frac{u_i}{v}\right[\le C_{доп} \qquad (23)$$

- на значение коэффициентов готовности ИМ

$$\frac{T_i^p}{T_i^p + T_i^B} \ge K_{Гi}^{доп}, i = 1,2,...,M \qquad (24)$$

- на объем пространства хранения в ЦХОИ

$$\sum_{i=1}^{M}(\psi_{ij} + y_{ij})u_i \le V_j, j = 1,2,...,N \qquad (25)$$

- на значения переменных

$$y_{ij} = \{0,1\}, \sum_{j=1}^{N}y_{ij} = 1, i = 1,2,...,M; \psi_{ij}y_{ij} = 0 \forall i, j \qquad (26)$$

где C_j – стоимость хранения единицы объема информации в j-м ЦХОИ;

v – размер единицы объема хранения информации;

$C_{доп}$ – максимально возможное значение стоимости хранения резерва ИМ в РИС;

$K_{Гi}^{доп}$ – минимально допустимое значение коэффициента готовности при эксплуатации ИМ.

Задача (22)-(26) относится к классу задач дискретного линейного программирования с булевыми переменными и может быть сведена к задаче о ранце [3], для решения которой могут быть использованы существующие методы дискретной оптимизации [1]. Ее решение позволит минимизировать время восстановления работоспособности АСУ СН в случае нарушения целостности информации.

Применение разработанных математических моделей позволит комплексно обеспечить устойчивое функционирование АСУ СН на этапах проектирования, эксплуатации и совершенствования, а также позволит осуществить реконфигурацию системы и рациональное распределение информационных ресурсов на различных этапах жизненного цикла АСУ СН.

Разработка методики применения разработанных математических моделей в условиях реконфигурации технических средств АСУ СН

К необходимости выполнения реконфигурации АСУ СН могут привести события, результатом которых является долговременное нарушение доступа к одному или нескольким ИМ. Данные события могут быть связаны с нарушением функционирования узла ЦХОИ, в котором осуществлялась обработка и хранение ИМ, каналов передачи данных и привести к невозможности решения ряда функциональных задач в АСУ СН (или отдельных ее сегментах и узлах), связанных с ИМ, доступ к которым нарушен.

Восстановление работоспособности АСУ СН в полном объеме без изменения состава программно-аппаратных средств и в короткие сроки в этом случае возможно только путем реконфигурирования.

Реконфигурирование АСУ СН должно основываться на перераспределении информационных ресурсов по работоспособным ЦХОИ с учетом результатов решения задач обеспечения устойчивости ее функционирования, полученных ранее.

Обозначим через

$\psi^* = \left\| \psi^*_{ij} \right\|, i = 1,2,...,M; j = 1,2,...,L$ – результат решения задачи распределения ИМ по ЦХОИ в РИС;

γ – номер узла СХОД, вышедшего из строя;

J – номер ЦХОИ, размещенный в узле с номером $\gamma (\gamma \in X_p)$;

$Y^* = \left| y^*_{ij} \right|, i = 1,2,...,M; j = 1,2,...,N$ – результат решения задачи распределения восстановительного резерва ИМ по ЦХОИ.

Перераспределению должны подлежать ИМ и резерв ИМ, доступ к которым был заблокирован при возникновении подобных событий.

В этом случае методика реконфигурации АСУ СН будет включать следующие шаги:

1. Определение узла СХОД γ, вышедшего из строя ЦХОИ.

2. Определение состава множества Z, доступ к которым был нарушен

$$m \in Z, \psi^*_{mj} = 1, j = \gamma, m = 1,2,...,M$$

Если число ЦХОИ в АСУ СН равно 2, то есть $|X_p| = 2$, то задача перераспределения ИМ по работоспособным ЦХОИ сводится к восстановлению ИМ из его восстановительного резерва, ранее распределенного на вышедший из строя ЦХОИ, в работоспособный ЦХОИ. Переход к п.5.

В противном случае сформулировать и осуществить решение задачи распределения ИМ, входящих в множество Z, в следующем виде.

Определить такие значения

$$\psi_{lm}, l \in Z, m \in X_p, m \neq y,$$

что

$$T = \min \sum_{j=1, j \neq y}^{L} \sum_{k=1}^{K} \varphi_{kj} (t^{\acute{y}}_{kj} + \sum_{l \in Z} \bar{\omega}_{kl} \frac{L_{kl}}{l_{\acute{Y}}} \sum_{m \in X_p, m \neq y} \psi_{lm} t_{jm}) \quad (27)$$

при ограничениях (28), определяющих объем пространства на носителях для хранения информационных массивов

$$\sum_{l \in Z} \psi_{li} u_l \leq V_j - \sum_{k=1, k \notin Z}^{M} \psi^*_{kj} u_k, j \in X_p, j \neq \gamma \quad (28)$$

Ограничение (28) учитывает распределение объема пространства среды хранения на ранее распределенные ИМ в ЦХОИ. Перейти к п.3

3. Определение множества ИМ Z_1^p, резерв которых размещался в узле γ

$$i \in Z_1^p, y^*_{im} = 1, m = j, i = 1,2,...,M$$

Если число ЦХОИ в РИС УП равно 2, то есть $|X_p| = 2$, то задача перераспределения резерва ИМ, будет сводиться к созданию резерва ИМ, который был размещен на вышедшем из строя ЦХОИ в работоспособном из рабочих копий ИМ. Переход к п.5

В противном случае сформулировать и решить задачу перераспределения восстановительного резерва ИМ, вышедшего из строя ЦХОИ в следующем виде.

Определить такие значения

$$\left\| y_{ij} \right\|, i \in Z_1^p; j = 1,2,...,N,$$

что

$$\sum_{i \in Z_1^p} \sum_{l=1}^{N} \psi_{il} \sum_{m=1, m \neq j}^{N} y_{im} (\frac{u_i}{v_{li}} + t^p_{il}) \to \min \quad (29)$$

при ограничениях:

- на стоимость хранения резерва ИМ

$$\sum_{j=1, j \neq \gamma}^{N} C_{ji} (\sum_{i=1}^{M} y^*_{il} \left] \frac{u_i}{v} \right[+ \sum_{K \in Z_1^p} y_{ij} \left] \frac{u_k}{v} \right[) \leq C \quad (30)$$

- на значение коэффициентов готовности ИМ

$$\frac{T_i^p}{T_i^p + T_i^B} \geq K^{доп}_{Гi}, i \in Z_1^p \quad (31)$$

- на объем пространства хранения в ЦХОИ

$$\sum_{i=1}^{M} \psi_{ij} u_i + \sum_{i=1, i \notin Z_1^p}^{M} y^*_{ij} u_i + \sum_{k \notin Z_1^p} y_{kj} u_k \leq V_j, j = 1,2,...,N, j \neq y \quad (32)$$

- на значения переменных

$$y_{ij} = \{0,1\}, \sum_{j=1}^{N} y_{ij} = 1, i \in Z_1^p; \psi_{il} y_{ij} = 0 \forall i, j \quad (33)$$

Перейти к п.4.

4. При необходимости осуществить перераспределение резерва ИМ, перераспределенных в ЦХОИ, хранящих их же резерв. Для чего определить состав множества Z_2^p ИМ, распределенных совместно с их резервом.

$$l \in Z_2^p \ при \ \psi_{il} y_{ij} = 1, l \in Z, j \in X_p, j \neq \gamma$$

Если $|Z_2^p| \neq \varnothing$, то для обеспечения сохранности ИМ в РИС после перераспределения ИМ по работоспособным ЦХОИ необходимо осуществить перераспределение восстановительного резерва ИМ с номерами из множества Z_2^p. В противном

случае перераспределение резерва ИМ не требуется. План перераспределения восстановительного резерва формируется путем решения задачи (29)-(33) в формулировке для множества Z_2^p.

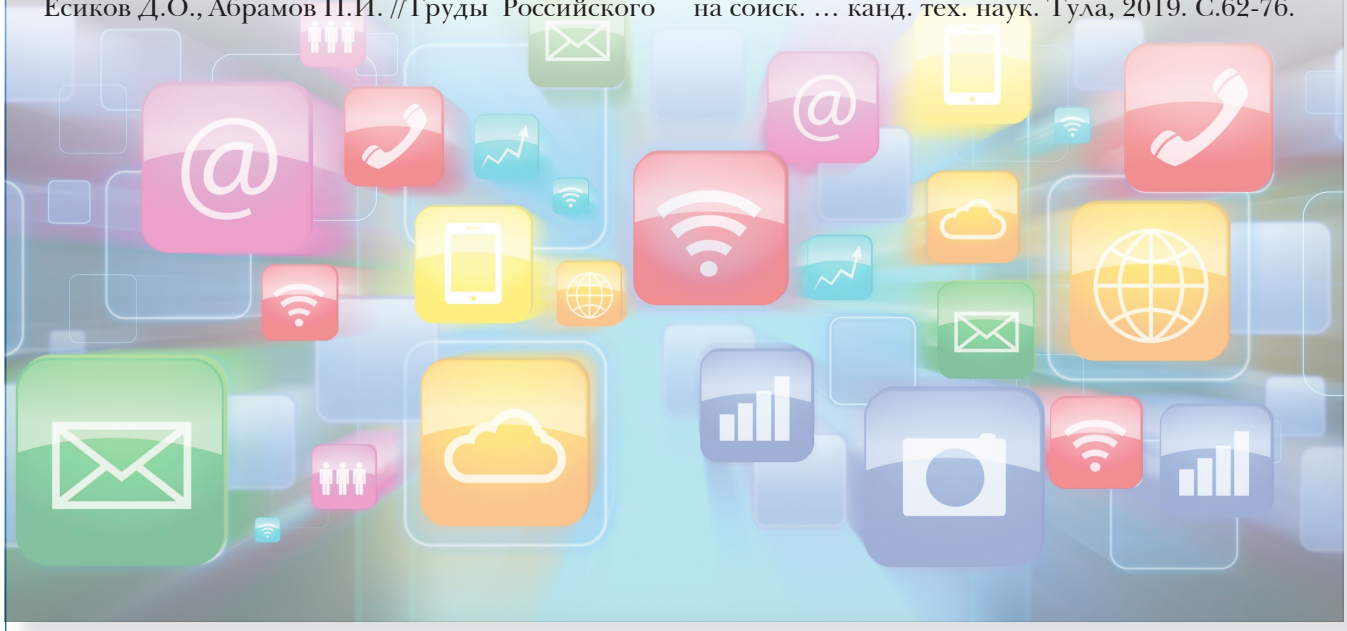
5. Конец.

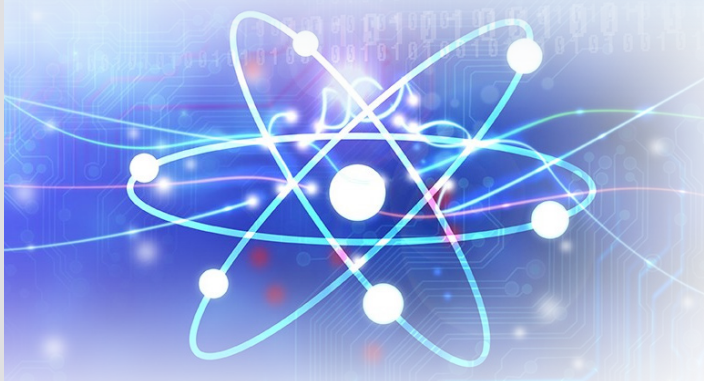
Заключение

Использование данной методики и задач (18)-(21) и (22)-(26) позволит принимать обоснованные решения по реконфигурации ЦХОД АСУ СН в случае выхода из строя их элементов. Получение планов реконфигурации ЦХОД в наиболее сжатые сроки связано с выбором соответствующего метода дискретной оптимизации, обеспечивающего получение точного (рационального) решения задач (27)-(28), (29) и (30)-(33) в условиях жестких временных ограничений.

Литература

1. Алексеев О.Г. Комплексное применение методов дискретной оптимизации. М.: Наука, 1987. 248 с.
2. Михалевич В.С., Волкович В.Л. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем. М.: Наука, 1987. 286 с.
3. Сергиенко И.В. Классификация прикладных методов комбинаторной оптимизации / Сергиенко И.В., Гуляницкий Л.Ф., Сиренко С.И. // Кибернетика и системный анализ, 2009. С.71-83.
4. Есиков Д.О. Задачи обеспечения устойчивости функционирования распределенных информационных систем // Программные продукты и системы, 2015. №4(112). С.133-141.
5. Есиков Д.О. Математическая модель обеспечения сохранности информации в распределенных информационных системах за счет резервирования информационных массивов / Есиков Д.О., Абрамов П.И. //Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, выпуск XXXII, изд. ТулГУ, 2014. С.251-255.
6. Киселёв В.Д., Есиков О.В., Кислицын А.С. Защита информации в современных системах ее передачи и обработки. М: Солид., 2000. 201 с.
7. Цимбал В.А., Стрельчук А.С. Оптимизация распределения элементов программного обеспечения функциональных задач по узлам системы хранения и обработки данных комбинированным методом / XIX Российская межведомственная научно-техническая конференция «Новые информационные технологии в системах связи и управления». Сборник трудов. Калуга, 2020. С.156-158.
8. Цимбал В.А., Стрельчук А.С. Математическая модель оптимизации состава комплекса технических средств хранения данных методом встречного решения функциональных уравнений динамического программирования. Доклад в рамках круглого стола. Применение новых инфокоммуникационных технологий и средств связи в РВСН. Сборник трудов. Кубинка, 2020. С.87-89.
9. Цимбал В.А., Стрельчук А.С. Оптимизация распределения информационных массивов по центрам хранения и обработки информации методом использования двойственной задачи / Сборник Всероссийской конференции «Современные технологии обработки сигналов – 2020».
10. ГОСТ Р 53111-2008 Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки.
11. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
12. Есиков Д.О. Управление информационными процессами промышленных предприятий. Дисс. на соиск. … канд. тех. наук. Тула, 2019. С.62-76.





УДК 539.182

О НЕПРИВОДИМЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЯХ КОМПЛЕКСНЫХ И ВЕЩЕСТВЕННЫХ НЕАБЕЛЕВЫХ ЛИ АЛГЕБР

ON IRREDUCIBLE REPRESENTATIONS COMPLEX AND REAL NON-ABELIAN LIE ALGEBRAS

Сергей Владимирович Смуров
почетный работник науки и техники РФ
доктор технических наук, профессор
Первый Вице-президент Института – Главный конструктор
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93
E-mail: Svs_iif@mail.ru

Геннадий Германович Волков
доктор физико-математических наук, профессор
старший научный сотрудник
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93
E-mail: gennadii.volkov@rambler.ru

Аннотация

Данная статья посвящена краткому обзору комплексных неабелевых алгебр Ли sl(2,C) и sl(3,C) с целью понимания возможностей расширения алгебр Ли на базе новых мультинарных комплексных чисел. В качестве анализа рассмотрены неприводимые представления неабелевой sl(2,C) и sl(3,C) и их вещественных форм su(2) и su(3). Одно из интересующих нас свойств алгебры tsl(3,TC) (tsu(3)), созданной на базе алгебры тернарных комплексных неабелевых гиперчисел, по сравнению с алгеброй sl(3,C) (su(3)), является возникновение в ней трех определяющих представлений.

Ключевые слова: квантовая физика, квантовая информатика, вещественные/комплексные алгебры Ли и группы Ли, многообразия, мультинарные алгебры и группы, неприводимые представления, корни и веса, бинарные и мультинарные комплексные числа.

Summary

This article is devoted to a brief survey of complex non-Abelian Lie algebras sl(2,C) and sl(3,C) in order to understand the possibilities of extending Lie algebras on the basis of new multinary complex numbers. As an analysis, we considered irreducible representations of non-Abelian sl(2,C) and sl(3,C) and their real forms su (2) and su (3). One of the interesting properties of the algebra tsl(3,TC) (tsu(3)), created on the basis of the algebra of ternary complex non-Abelian hypernumbers, in comparison with the algebra sl(3,C) (su(3)), is the appearance in it of three defining representations.

Keywords: quantum physics, quantum informatics, real/complex Lie algebras and Lie groups, varieties, multinary algebras and groups, irreducible representations, roots and weights, binary and multinary complex numbers.

1. Непрерывные симметрии, группы и алгебры Ли

Непрерывные симметрии описываются группами с топологией, которая определяла бы непрерывность и, более того, гладкость структуры многообразия. Группа Ли, это G, это групповое и гладкое многообразие, то есть оно имеет две совместимые структуры. Совместимость групповой структуры и гладкой структуры требует, чтобы групповое умножение GxG→G, (g,h) →gh, и обратное действие G→G, $g \to g^{-1}$ являлись гладкими функциями. Исходя из этого можно дать абстрактное определение группы Ли в рамках дифференциальной геометрии или для матричных групп Ли через определенные свойства соответствующего множества матриц.

Таким образом, помимо их групповой структуры, важнейшими особенностями групп Ли являются их локальная дифференцируемая структура многообразия, характеризующаяся как локальной, так и глобальной топологией. Особенно важными для групп Ли являются топологические понятия связности, односвязности и компактности. Дифференцируемая структура связана с локальным возникновением группы Ли, фактически, вблизи нейтрального элемента(единицы группы), так что бесконечно-малая структура группы Ли определяет ее алгебру Ли. В результате, в значительной степени изучение групп Ли сводится к гораздо более непосредственному линейно-алгебраическому исследованию их алгебр Ли [1-7].

Например, конечномерные представления односвязной группы SU(3) находятся во взаимно однозначном соответствии с конечномерными представлениями алгебры Ли su(3). Тем временем, комплексные представления su(3) находятся во взаимно однозначном соответствии с комплексно-линейными представлениями комплексифицированной алгебры Ли su(3)c=sl(3,C). Более того, представление SU(3) неприводимо тогда и только тогда, когда ассоциированное представление su(3) неприводимо, и это верно тогда и только тогда, когда ассоциированное комплексно-линейное представление sl(3,C) неприводимо. Таким образом, между конечномерными комплексными представлениями П группы SU(3) и конечномерными комплексно-линейными представлениями π алгебры sl(3,C) существует взаимно однозначное соответствие. Это соответствие определяется следующим соотношением [2]: $\Pi(e^X)=e^{\pi(X)}$ для всех $X\in su(3)\subset sl(3,C)$.

Представление П неприводимо тогда и только тогда, когда представление π является неприводимым. Нас будут интересовать группы Ли и алгебры Ли над расширением поля вещественных чисел до поля комплексных чисел [1-7] и в будущем далее, до тернарных комплексных чисел и выше. Непосредственно практический интерес, прежде всего, связан с особенностями теории представлений групп Ли и алгебр Ли над полями комплексных мультинарных n=3,4,5, … чисел [8,9]. Представлением алгебры Ли $\hat{g}$ над полем k на K-векторном пространстве V с $k\subset K$, где K=R,C,TC,… является гомоморфизм Ли алгебры $\pi: \hat{g}\to End_K(V)$, такой что, для каждого $X\in\hat{g}$ отображение $\pi(X): V\to V$ является K-линейным:

$$\pi(X)(v_1+v_2)=\pi(X)v_1+\pi(X)v_2 \text{ для всех } v_1,v_2\in V, \quad (1)$$

$$\pi(X)(cv)=c\,\pi(X)v \text{ для всех } v\in V,\ c\in K, \quad (2)$$

а также чтобы $X\to\pi(X)$ гомоморфизм алгебр Ли сохранял k-линейность:

$$\pi(aX+bY)=a\,\pi(X)+b\,\pi(Y) \text{ для всех } a,b\in k \text{ и } X,Y\in\hat{g}, \quad (3)$$

и соблюдались скобки Ли:

$$\pi([X,Y])=\pi(X)\pi(Y)-\pi(Y)\,\pi(X) \text{ для всех } X,Y\in\hat{g} \quad (4)$$

2. Комплексификация вещественных алгебр Ли

Комплексификацию $\hat{g}$-алгебры Ли над R определяют, как прямую сумму R-векторных пространств $\hat{g}_C:=\hat{g}\oplus i\hat{g}=\{X+iY\,|\,X,Y\in R\}$(эквивалентно, $\hat{g}$-тензорное произведение R-векторных пространств $\hat{g}$ и $C=R\oplus iR=R^2$). Комплексификация $\hat{g}_C$ становится C-векторным пространством с очевидным векторным сложением:

$$(X_1+iY_1)+(X_2+iY_2)=(X_1+X_2)+(Y_1+Y_2) \text{ для всех } X_1, Y_1, X_2, Y_2\in\hat{g}, \quad (5)$$

и комплексное скалярное умножение:

$$(a+ib)(X+iY)=(aX-bY)+i(aY+bX) \text{ для всех } a, b\in R \text{ и } X, Y\in\hat{g} \quad (6)$$

Более того, она становится алгеброй Ли над C, определяя скобки как:

$$[X_1+iY_1, X_2+iY_2]=([X_1, X_2]-[Y_1,Y_2])+i([X_1,Y_2]+[Y_1,X_2]) \text{ для всех } X_1, Y_1, X_2. Y_2\in\hat{g}. \quad (7)$$

Если размерность вещественной алгебры Ли $\hat{g}$ равна $d=\dim R(\hat{g})$, то размерность комплексифицированной $\hat{g}_C$ как вещественного векторного пространства равна 2d. Однако нас больше интересует его размерность как комплексное векторное пространство, которая равна $\dim_C(\hat{g}_C)=d=\dim_R(\hat{g})$.

Комплексификация алгебры Ли so(3). Базис вещественной алгебры Ли $\hat{g}=so(3)$ состоит из R_x, R_y,R_z, коммутационные соотношения которых имею вид:

$$[R_x, R_y]=R_z;\ [R_y, R_z]=R_x;\ [R_z, R_x]=R_y, \quad (8)$$

Комплексификация $\hat{g}_C=so(3)$,

$$E=-R_y+iR_x\in\hat{g}_C;\ F=R_y+iR_x\in\hat{g}_C;\ H=2iR_z\in\hat{g}_C. \quad (9)$$

Легко видеть, что E,F,H, указанные выше, линейно независимы (над C) в $\hat{g}_C$ и, таким образом, образуют базис (над C) $\hat{g}_C$. Нетривиальные скобки Ли в этом базисе комплексификации $\hat{g}_C=so(3)\oplus iso(3)$ из $\hat{g}=so(3)$ являются

$$[H,E]=[2iR_z,-R_y+iR_x]=-2i[R_z,R_y]-2[R_z,R_x]=$$
$$=2iR_x-2R_y=2E, \quad (10)$$

$$[H,F]=[2iR_z,R_y+iR_x]=2i[R_z,R_y]-2[R_z,R_x]=$$
$$=-2iR_x-2R_y=-2F, \quad (11)$$

$$[E,F]=[-R_y+iR_x,R_y+iR_x]=-i[R_y,R_x]+i[R_x,R_y]=2iR_z=H. \quad (12)$$

С учетом этих соотношений следует, что комплексообразование so(3) изоморфно комплексной алгебре Ли sl(2,C). Первичное обоснование изучения представлений комплексной алгебры Ли $\hat{g}_C$ вместо реальной алгебры Ли $\hat{g}$ состоит в том, что комплексные представления обеих в основном те же самые.

Пусть $\hat{g}$ – вещественная алгебра Ли и $\hat{g}_C=\hat{g}\oplus i\hat{g}$ – ее комплексификация. Тогда любое комплексное представление $\hat{g}$ имеет уникальную структуру представления $\hat{g}_C$ (которая ограничивается обратно на $\hat{g}$ к исходному), и $Hom_{\hat{g}}(V,W)=Hom_{\hat{g}C}(V,W)$. Другими словами, категории комплексных представлений $\hat{g}$ и $\hat{g}_C$ эквивалентны. Пусть $\pi: \hat{g}\to End(V)$ – представление $\hat{g}$ в комплексном векторном пространстве V. Единственный C-линейный способ расширить его до $\hat{g}_C$ – определить $\pi_C:\hat{g}_C\to End(V)$, установив соотношение $\pi_C(X+iY)=\pi(X)+i\pi(Y)$.

3. Комплексная алгебра Ли sl(2,C) и ее представления

Комплексная алгебра Ли sl(2,C) изоморфна комплексификации вещественных алгебр Ли so(3) и su(2). Таким образом, комплексные представления so(3) и su(2) точно такие же, как

и представления sl(2,C). В частности, понимая представления sl(2,C), мы в конечном итоге поймем представления очень важных групп Ли SO(3) и SU(2), алгебры Ли которых суть so(3) и su(2), соответственно, sl(2,C) – трехмерная комплексная алгебра Ли, которая изоморфна комплексификации вещественных алгебр Ли so(3) и su(2). Таким образом, комплексные представления so(3) и su(2) точно такие же, как и представления sl(2,C). В частности, понимая представления sl(2,C), можно понять представления групп Ли SO(3) и SU(2), алгебры Ли которых суть so(3) и su(2), соответственно. Анализ всех (комплексных) полупростых алгебр Ли $\hat{g}$ и их представлений достигается путем нахождения подалгебр в $\hat{g}$, изоморфных sl(2,C) с применением теории представлений sl(2,C).

По определению sl(2,C) – это множество

$$sl(2,\mathbb{C}) = \{X \in \mathbb{C}^{2x2}, trX = 0\}$$

бесследных комплексных матриц размера (2x2), снабженных скобкой Ли [X,Y]=XY-YX. Как комплексное векторное пространство, оно трехмерно с использованием стандартного базиса

$$E = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, F = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, H = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix},$$

скобки Ли которых имеют соответствующий вид:

$$[H,E]=2E;\ [H,F]=-2F;\ [E,F]=H. \qquad (13)$$

Выбор базиса является фундаментальным примером канонического базиса, который может быть выбран для любой полупростой алгебры Ли. Можно привести два примера представлений sl(2,C), определяющее и присоединенное представления sl(2,C).

Пространство $V=C^2$ естественным образом является представлением sl(2,C), любой элемент X∈sl(2,C) является 2x2-матрицей, которая может действовать на любой вектор $v \in V=C^2$ путем умножения матриц π(X)v=Xv, т.е. $\pi(X)=X \in C^{2x2}=End(V)$, Это двумерное представление называется определяющим sl(2,C).

Присоединенным представлением sl(2,C) является векторное пространство V=sl(2,C), снабженное действием-умножением:

$$\pi(X)=ad(X)Y=[X,Y],\ X \in sl(2,C),\ Y=V \in sl(2,C) \quad (14)$$

Присоединенное представление sl(2,C) трехмерно, которое в базисе E,H,F алгебры π:sl(2,C)→End(sl(2,C) приобретает вид:

$$\pi(E)=X_1=\begin{pmatrix} 0 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \pi(H)=X_2=\begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix}, \pi(F)=X_3=\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \end{pmatrix}, \quad (15)$$

$$[X_a,X_b]=f_{ab,c}X_c. \qquad (16)$$

Рассмотрим весовые пространства в представлениях sl(2,C). Пусть V – конечномерное (комплексное) векторное пространство, несущее представление sl(2,C). Представление π: sl(2,C)→End (V) дает нам линейные отображения V→V, связанные с каждым элементом алгебры Ли X∈sl(2,C). Обозначим линейные отображения, ассоциированные с базисными элементами H, E, F следующим образом $\pi_H=\pi(H)$, $\pi_E=\pi(E)$, $\pi_F=\pi(F)$.

Это линейные отображения π_H: V→V; π_E: V→V; π_F: V→ V, которые в силу скобок Ли и свойства гомоморфизма π удовлетворяют коммутационным соотношениям:

$$\pi_H \pi_E - \pi_E \pi_H = 2\pi_E,\ \pi_H \pi_F - \pi_F \pi_H = -2\pi_F,$$
$$\pi_E \pi_F - \pi_F \pi_E = 2\pi_H. \qquad (17)$$

Матрицы H,E,F принадлежат векторному пространству C^{2x2}, а отображения $\pi_H,\pi_E,\pi_F \in End(V)=C^{dxd}$, где d=dim(V). Кроме того, преимуществом линейных отображений является то, что из них можно составлять произведения, например, $\pi_E\pi_F$ имеет смысл как линейное отображение V→V, а матричное произведение $EF \in C^{2x2}$ не является бесследным и, следовательно, не лежит в sl(2,C).

Произведения элементов в алгебре Ли не имеют смысла, поскольку алгебры Ли не ассоциативные алгебры. Однако можно было бы рассмотреть универсальную обертывающую алгебру U($\hat{g}$) алгебры Ли $\hat{g}$, которая является ассоциативной алгеброй, построенной таким образом, что она имеет те же самые представления что и $\hat{g}$.

Линейное отображение π_H: V→V диагонализуемо. Для μ∈C обозначим собственное подпространство π_H, соответствующее собственному значению μ, через:

$$V_\mu := \{v \in V | \pi_H v = \mu v\}, \qquad (18)$$

где собственные значения π_H называют весами μ(в представление V), а соответствующие собственные подпространства $V_\mu \subset V$ весовые пространства (в представление V). Обратите внимание, что если μ∈C не является весом (т.е. не собственным значением H), то $V\mu=\{0\} \subset V$.

Допуская диагонализуемость, получаем разложение по собственным подпространствам $V=\bigoplus_\mu V_\mu$. Следующая цель описывать действия E и F на υ_H – собственные подпространства Vμ, то есть повышение и понижение весов. Для любого μ∈C имеем $\pi_E(V_\mu) \subset V_{\mu+2}$ и $\pi_F(V_\mu) \subset V_{\mu-2}$. Предположим, что $v \in V_\mu$, т.е. $\pi_H v = \mu v$. Рассмотрим вектор $\pi_E v \in V$. Можно рассчитать действие π_H на V с помощью коммутационных соотношений:

$$\pi_H(\pi_E v)=\pi_E(\pi_H v)+[\pi_H,\pi_E]v=\mu\pi_E(v)+2\pi_E v=(\mu+2)\pi_E v. \quad (19)$$

Этот расчет показывает, что если v – собственный вектор оператора π_H с собственным значением μ, то $\pi_E v$ либо нуль, или собственный вектор π_H с собственным значением μ+2. Это доказывает, что $\pi_E(V\mu) \subset V_{\mu+2}$. Совершенно аналогичным вычислением мы видим, что $\pi_F(V_\mu) \subset V_{\mu-2}$. Из приведенной выше дискуссии вытекает существование векторов старшего веса для sl(2,C))

для конечномерных представлений V алгебры sl(2,C). В любом конечномерном представлении $V\neq\{0\}$ алгебры sl(2,C) существует ненулевой вектор $v\in V$ такой, что $\pi_E v_0=0$ и $\pi_H v_0=\lambda v_0$ для некоторого $\lambda\in C$. Вектор $v_0\neq 0$ в представлении V алгебры sl(2.C), удовлетворяющем $\pi_E v_0=0$ и $\pi_H v_0=\lambda v_0$, называется высший весовой вектор высшего веса.

4. Неприводимые представления sl(2,C)

Для каждого $\lambda\in Z_{\geq 0}$ существует неприводимое $(\lambda+1)$-мерное представление $L(\lambda)$ алгебры sl(2,C) с базисом $v_0, v_1,\ldots,v_\lambda$ со следующими действиями $\pi_H(\lambda), \pi_E(\lambda), \pi_F(\lambda)$:

$$\pi_\lambda(F)v_n=\begin{cases} v_{n+1},\ldots если\ldots 0\leq n<\lambda \\ 0,\ldots если\ldots\ldots n=\lambda \end{cases}$$
$$\pi_\lambda(E)v_n=\begin{cases} 0,\ldots\ldots\ldots\ldots если\ldots\lambda=0 \\ (\lambda-n+1)nv_{n-1},\ldots\ldots если\ldots 0<\lambda\leq n \end{cases} \quad (20)$$
$$\pi_\lambda(H)v_n=(n-2\lambda)v_n\ldots для\ldots всех\ldots n$$

Любое неприводимое конечномерное представление sl(2,C) изоморфно L (λ) для некоторого $\lambda\in Z_{\geq 0}$. Если V – конечномерное неприводимое представление sl(2,C), то существует вектор v_0 старшего веса некоторого старшего веса $\lambda\in C$ в V, фактически $\lambda\in Z_{\geq 0}$. Обозначим $v_j=\pi_F^j v_0$ для $j\in Z_{\geq 0}$, векторы $v_0, v_1,\ldots,v_\lambda$ охватывают подпредставление в V, который по неприводимости должно быть всем V.

В неприводимом sl(2,C) представлении V размерности dim(V)=d (единственный) старший вес λ=d-1. Собственные значения оператора H равны: λ, λ-2, λ- 4,…, -λ+4, -λ+2, -λ.

Тривиальное представление алгебры Ли ĝ в векторном пространстве C определяется как $\upsilon(X)=0\in End(C)$ для всех $X\in\hat{g}$.Тривиальное представление V=C одномерно, а значит, обязательно неприводимо, единственная одномерная неприводимая форма sl(2,C) соответствует λ=0, так что $V\cong L(0)$.

Определяющее представление sl(2,C)) это пространство $V=C^2$, в котором любой элемент $X\subset sl(2,C)$, являющийся 2x2-матрицей, действует на любой вектор $v\in V=C^2$ матричным умножением $\pi(X)v=Xv$, т.е.

$$\pi(X)=X\in C^{2x2}\cong End\ (V). \quad (21)$$

Это двумерное представление называется определяющим sl(2,C). Пространство $V=C^2$ является представлением sl(2,C), когда элементы sl(2,C) понимаются как 2x2-матрицы, и действие такой матрицы на вектор в C^2 есть обычное умножение матрицы на вектор. Если $x=[1,0]^T$ и $y=[0,1]^T$ являются стандартным базисом, то имеем Hx=x и Hy=-y, так что собственные значения H равны +1 и -1, а соответствующие весовые пространства – это $V_{+1}=Cx$ и $V_{-1}=Cy$. Так как Ex=0, то $x\in V$ является вектором наивысшего веса с наибольшим весом λ=1, и поэтому он генерирует неприводимое подпредставление размерности d=λ+1=2=dim (V), которое, следовательно, по размерности все состоит из V. Следовательно, определяющее представление неприводимое, V=L(1)

Присоединенным представлением sl(2,C) является векторное пространство V=sl(2,C), снабженное присоединенным действием:

$$\pi(X)Y=ad_X(Y)=[X, Y],\ X\in sl(2,C)\ и\ Y\in V=sl(2,C) \quad (22)$$

Это трехмерное представление sl2(C). Конкретно в базисе E,H,F алгебры sl(2,C) присоединенное представление π: sl(2,C→End(sl(2,C)) приобретает вид (15). Векторное пространство V=sl(2,C) является представлением алгебры Ли sl(2,C), вызванное присоединенным действием, где действие генераторов $\pi_E=ad_E$, $\pi_F=ad_F$ и $\pi_H=ad_H$ определено в следующим образом:

$$\pi_H E=ad_H(E)=[H,E]=2E,$$
$$\pi_H H=ad_H(H)=[H,H]=0,$$
$$\pi_H F=ad_H(F)=[H;F]=-2\ F. \quad (23)$$

так что собственные значения H равны +2, 0 и -2, каждое с кратностью один в соответствующие весовые пространства: $V_{+2}=CE$, $V_0=CH$ и $V_{-2}=CF$. Так как, $\pi_E E=ad_E(E)=[E,E]=0$, то E – вектор старшего веса со старшим весом λ=2, порождающий неприводимое подпредставление размерность d=λ+1=3=dim(V), которая по размерности, следовательно, является всем V=L(2).

Квадратичный Казимир в представлениях sl(2,C). Предположим, что V – комплексное векторное пространство и $\pi_E, \pi_F, \pi_H\in End\ (V)$ удовлетворяют условию $\pi_H\pi_E-\pi_E\pi_H=2\pi_E$, $\pi_H\pi_F-\pi_F\pi_H=-2\pi_F$, $\pi_E\pi_F-\pi_F\pi_E=\pi_H$. Оператор

$$Q=\pi_E\pi_F+\pi_F\pi_E+1/2\pi_H^2 \quad (24)$$

коммутирует с π_E, π_F и π_H. Пусть π:sl2(C)→End(V) – конечномерное неприводимое представление sl(2,C). $Q=\pi_E\pi_F+\pi_F\pi_E+1/2\pi_H^2$ является скалярным кратным тождества оператор на V, то есть $Q=q\cdot id_V$ для некоторого $q\in C$. Полная приводимость представлений sl(2,C). Любое конечномерное представление V алгебры sl(2,C) является прямой суммой своих неприводимых представлений [2-7]:

$$V\cong L(\lambda_1)\oplus\ldots\oplus L(\lambda_n)$$

для некоторых n и $\lambda_1,\ldots,\lambda_n\in Z_{\geq 0}$.

5. Алгебра Ли sl(3,C) и ее неприводимые представления

Основным результатом теории алгебры sl(3,C) является теорема, которая утверждает, что неприводимое конечномерное представление sl(3,C) можно классифицировать в терминах своего «наивысшего веса». Это аналогично маркировке неприводимых представлений V_m группы SU(2) или sl (2,C) старшим собственным зна-

чением матрицы $\pi_m(H)$. Наивысшее собственное значение $\pi_m(H)$ в V_m равно m [2-7].

Алгебра sl(3,C) представляет собой комплексификацию вещественной su(3) алгебры Ли SU(3) группы Ли. Представления алгебры sl(3,C) необходимы например в квантовой хромодинамике (КХД), теории взаимодействия цветных кварков с глюонами в адронах: в протоне, нейтроне и т.д. Анализ структуры sl(3,C) и ее представлений следует примерно такой же стратегии, как и в случае sl(2,C), с учетом того обстоятельства, что алгебра sl(3,C) содержит sl(2,C), как подалгебры, и можно использовать результаты ее теории неприводимых представлений. Алгебра sl(3,C) – это комплексное векторное пространство, образованное бесследовыми комплексными 3x3-матрицами:

$$sl(3,C) = \{X \in C^{3x3}, tr(X) = 0\}, \qquad (25)$$

снабженное произведением элементов в виде скобки Ли [X,Y]=XY-YX. Как комплексное (вещественное) векторное пространство, оно является восьмимерным (16-мерным). Заметим, что алгебра является 8-мерным вещественным векторным пространством.

Мы будем использовать следующий базис для sl(3,C):

$$X_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, X_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, X_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$Y_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, Y_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, Y_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \qquad (26)$$

$$H_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, H_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix},$$

Очевидно, следует, что тройка генераторов $\{H_1, X_1, Y_1\}$ образует подалгебру алгебры sl(3,C), которая изоморфна sl(2,C). Точно так же оболочка $\{H_2, X_2, Y_2\}$ является подалгеброй изоморфной sl(2,C).

Классификация представлений sl(3,C) состоит в одновременной диагонализации $\pi(H_1)$ и $\pi(H_2)$. Так как H_1 и H_2 коммутируют, $\pi(H_1)$ и $\pi(H_2)$ также будут коммутировать для любого представления π, и поэтому $\pi(H_1)$ и $\pi(H_2)$ также можно одновременно диагонализовать. Если (π,V) является представлением sl(3;C), то упорядоченная пара $\mu=(m_1,m_2)\in C^2$ является весовым вектором представления π, если существует $v\neq 0$ в V такое, что $\pi(H_1)v=m_1v$, $\pi(H_2)v=m_2v$. Если $\mu=(m_1, m_2)$ – весовой вектор, то пространство всех собственных векторов v, включая нулевой вектор, образует весовое пространство, соответствующее весу μ. Кратность веса – это размерность соответствующего весового пространства. Эквивалентные представления имеют одинаковые веса и кратности.

Каждое представление sl(3,C) имеет хотя бы один вес. Над полем комплексных чисел, $\pi(H_1)$ имеет хотя бы одно собственное значение $m_1\in C$. Пусть $W\subset V$ – собственное подпространство для $\pi(H_1)$ с собственным значением m_1. Поскольку $[H_1,H_2]=0$, $\pi(H_2)$ коммутирует с $\pi(H_1)$, $\pi(H_2)$ должно отображать W в себя. Таким образом, $\pi(H_2)$ можно рассматривать как оператор на W. Тогда ограничение $\pi(H_2)$ на W должно иметь хотя бы один собственный вектор w с собственным значением $m_2\in C$, а w – одновременный собственный вектор для $\pi(H_1)$ и $\pi(H_2)$ с собственными значениями m_1 и m_2.

Каждое представление π группы sl(3,C) можно рассматривать с ограничением, как представление подалгебры {H1,X1,Y1}. В общем случае, оно, ограниченное на $\{H_1,X_1,Y_1\}$, должно быть неким конечномерным представлением sl(2,C). То же самое относится и к ограничению π в подалгебру $\{H_2,X_2,Y_2\}$, которая также изоморфна sl(2,C).

Известно утверждение, что в любом конечномерном представление sl(2,C), приводимое или неприводимое, все собственные значения $\pi(H)$ должны быть целыми числами. Это утверждение приводит к очень важному следствию, что для представления π алгебры sl(3,C) все веса π имеют вид $\mu=(m_1,m_2)$, где m_1 и m_2 – целые числа, для доказательства которого необходимо применить вышеупомянутое утверждение к ограничению π на $\{H_1,X_1,Y_1\}$ и ограничению π на $\{H_2,X_2,Y_2\}$. После этого замечательного факта дальнейший путь состоит в определении одного одновременного собственного вектора для $\pi(H_1)$ и $\pi(H_2)$ и последующего последовательного применения действия на него $\pi(X_i)$ или $\pi(Y_i)$.

Упорядоченная пара $\alpha=(a_1,a_2)\in C^2$ является корнем, если существует $Z\in sl(3,C)$ такое, что $[H_1,Z]=a_1Z, [H_2,Z]=a_2Z$, $a_1\neq 0$, $a_2\neq 0$ не равны нулю, и соответствующий $\alpha=(a_1,a_2)\in C^2$ корневой вектор Z, являющийся одновременным собственным вектором для ad_{H1} и ad_{H2}, который входит в присоединенное представление. Таким образом, корни – это в точности ненулевые веса присоединенного представления, причем a_1 и a_2 должны быть целыми числами. В чем можно убедиться непосредственно из коммутационных соотношений алгебры sl(3,C), в которой существует шесть корней:

$$\alpha(X_1)=(2,-1),\ \alpha(X_2)=(-1, 2),\ \alpha(X_3)=(1,1),\ \alpha(Y_1)=(-2,1),$$
$$\alpha(Y_2)=(1,-2),\ \alpha(Y_3)=(-1,-1) \qquad (27)$$

H_1 и H_2 являются одновременными собственными векторами для adH_1 и adH_2, но они не являются корневыми векторами, потому что одновременные собственные значения равны нулю. Эти шесть корней образуют 2-мерную «корневую систему» алгебры sl(2,C), называемую A_2, в которой можно выделить два корня, $\alpha_1=(2,-1)$, $\alpha_2=(-1,2)$, соответствующие X_1 и X_2. Положи-

тельный (соответственно отрицательный) корень является простым или примитивным, если он не может быть выражен как сумма двух положительных (соответственно отрицательных) корней. Корни α_1 и α_2 называются положительными простыми корнями, так как все остальные корни могут быть выражены как линейные комбинации α_1 и α_2 с целыми коэффициентами, и эти коэффициенты равны (для каждого корня) либо все больше или равны нулю, либо все меньше или равны нулю:

$$(2,-1)=\alpha_1,(-1,2)=\alpha_2,\ (1,1)=\alpha_1+\alpha_2,$$
$$(-2,1)=-\alpha_1,(1,-2)=-\alpha_2,\ (-1,-1)=-\alpha_1-\alpha_2. \quad (28)$$

Выбор α_1 и α_2 как положительных простых корней произволен, так как может быть выбрана любая другая пара корней с аналогичными свойствами. Корневые системы для теории представлений sl(3,C) играют решающую роль в классификации представлений sl(3,C). Аналогом к классификации представлений sl(2,C) является следующее утверждение:

$\alpha=(a_1, a_2)$ – корень, а Z_α – соответствующий корневой векторов sl(3;C). Пусть π представление sl(3,C), $\mu=(m_1,m_2)$ вес для π и $v\neq 0$ – соответствующий весовой вектор:

$$\pi(H_1)\pi(Z_\alpha)v=(m_1+a_1)\pi(Z_\alpha)v,$$
$$\pi(H_2)\pi(Z_\alpha)v=(m_2+a_2)\pi(Z_\alpha)v. \quad (29)$$

Таким образом, либо $\pi(Z_\alpha)v=0$, либо $\pi(Z_\alpha)v$ – новый весовой вектор с весом $\mu+\alpha=(m_1+a_1, m_2+a_2)$. Из коммутационного соотношения $[H_1,Z_\alpha]=a_1Z_\alpha$, следует, что:

$$\pi(H_1)\pi(Z_\alpha)v=(\pi(Z_\alpha)\pi(H_1)+a_1\pi(Z_a))v=\pi(Z_\alpha)$$
$$(m_1v)+a_1\pi(Z_\alpha)v=(m_1+a_1)\pi(Z_\alpha)v. \quad (30)$$

Аналогично можно вычислить $\pi(H_2)\pi(Z_\alpha)v$.

Из неприводимых представлений с sl(3,C), как и в случае с теорией представлений алгебры sl(2,C), надо выделить тривиальное, присоединенное и два определяющих представления.

Как в любой алгебре Ли, тривиальное представление определяется в одномерном векторном пространстве V=C следующим образом:

$$\pi: sl(3,C)\to End(C),\ \pi(X)=0,\ X\in sl(3,C). \quad (31)$$

Кроме того, 8-мерное векторное пространство V=sl(3,C) несет 8-мерное присоединенное представление:

$$ad: sl(3,C)\to End(sl(3,C));$$
$$ad_X(Y)=[X,Y],\ X\in sl(3,C),\ Y\in V=sl(3,C). \quad (32)$$

Наконец, пространство $V=C^3$ естественным образом является определяющим 3-х мерным представлением sl(3,C): любой элемент $X\in sl(3,C)$, являющийся 3x3-матрицей, может воздействовать на любой вектор $v\in V=C^3$:

$$\pi(X)v=Xv,\ \text{т.е. } \pi(X)=X\in C^{3x3}=End(V). \quad (33)$$

Оказывается, что к определяющему представлению $V=C^3$ можно построить дуальное V^*.

В анализе весов и весовых подпространств алгебры sl(3,C) следуют центральной идее об одновременной диагонализации всего картановского подпространства $h\subset sl(3,C)$. Для такой одновременной диагонализации в любом представлении необходимы операторы, коммутирующие друг с другом, образующие абелеву подалгебру в sl(3,C). Например, можно выбрать h, состоящую из всех диагональных матриц в sl(3,C):

$$h=\left\{H=\begin{pmatrix} h_{11} & 0 & 0\\ 0 & h_{22} & 0\\ 0 & 0 & h_{33}\end{pmatrix}, \sum_i h_{pp}=0, h_{pp}\in\mathbb{C}, p=1,2,3\right\}. \quad (34)$$

Поскольку рассматривается диагонализация всего пространства операторов, понятие собственного значения должно быть соответствующим образом обобщено. Если векторное пространство V имеет представление π: $sl(3,C)\to End(V)$ и $v\in V$ является одновременным собственным вектором для действия всех $H\in h$, тогда мы имеем:

$$\pi(H)v=\mu(H)v \text{ для всех } H\in h, \quad (35)$$

где $\mu(H)\in C$ обозначает собственное значение линейного отображения $\pi(H):V\to V$ соответствующий элементу $H\in h$. Очевидно, тогда $\mu(H)$ должен линейно зависеть от H, и таким образом определяет линейный функционал $\mu:h\to C$, т.е. элемент $\mu\in h^*$ двойственного к h. Это подходящее обобщение собственных значений и собственных векторов. Собственный вектор $v\neq 0$ в представлении V, $v\in V$, называют весовым вектором, а $\mu\in h^*$ его весом. Для любых $\mu\in h^*$ весовое пространство:

$$V_\mu=\{v\in V|\pi(H)v=\mu(H),\ H\in h\} \quad (36)$$

определяется как пространство всех весовых векторов с весом μ, а веса V $\mu\in h^*$ для которых $V_\mu\neq\{0\}$.

Трехмерное пространство $V=C^3$ несет определяющее представление π: $X\to X$, $X\in sl(3,C)$. Рассмотрим в C^3 стандартные базисные векторы (2-7)

$$e_1=\begin{pmatrix}1\\0\\0\end{pmatrix}, e_2=\begin{pmatrix}0\\1\\0\end{pmatrix}, e_3=\begin{pmatrix}0\\0\\1\end{pmatrix}. \quad (37)$$

Для диагональной матрицы $H=diag(h_{11},h_{22},h_{33})$, $He_p=h_{pp}e_p$. Таким образом, веса в определяющем представлении $V=C^3$ для sl(3,C) равны μ^1, μ^2, μ^3 с соответствующими весовыми пространствами: $V_{\mu1}=Ce_1, V_{\mu2}=Ce_2$, $V_{\mu3}=Ce_3$. Определенное представление имеет разложение весового пространства:

$$V=C^3=Ce_1\oplus Ce_2\oplus Ce_3 \quad (38)$$

Определенные выше три веса $\mu^1,\mu^2,\mu^3\in h^*$ лежат в двумерном пространство h, линейно зависимые $\mu^1+\mu^2+\mu^3=0$, что следует из tr(H)=0 диагональных матриц $H\in h\subset sl(3,C)$.

Веса в дуальном к определяющему представлению sl(3,C). Напомним, что если $\pi:\hat{g}\to End(V)$ – представление алгебры Ли $\hat{g}$ в векторном про-

странстве V, тогда дуальное V* несет представление $\pi^*:\hat{g}\to End(V^*)$ так, что для любых $X\in\hat{g}$ и $\rho\in V^*$ дуальный элемент $\pi(X)\rho$ – это функционал $\pi\to-\rho(\pi(X)v)$ на V. Дуальное V* к определяющему представлению $V=C^3$ группы sl(3,C) является трехмерным представлением. Пусть $\upsilon_1,\upsilon_2,\upsilon_3\in V$ – базис, дуальный к стандартному базису $e_1,e_2,e_3\in V$, т.е. $\upsilon_j(e_i)=\delta_{i,j}$ для всех $i,j\in\{1,2,3\}$. Если $H\in h$, то $<\pi^*(H)\upsilon_j, e_i>=-<\upsilon_j,He_i>=-<\upsilon_j, \mu^i(H)e_i>=-\mu^i(H)$. Базисные векторы υ_1, υ_2, υ_3, таким образом, весовые вектора, с соответствующими весами $-\mu^1,-\mu^2,-\mu^3$ и разложение весового пространства дуальное V* к определяющему представлению $V=C^3$ группы sl(3,C) является

$$V^* = C\upsilon_1 \oplus C\upsilon_2 \oplus C\upsilon_3 \qquad (39)$$

$$V^* = (V^*)_{-\mu^1} \oplus (V^*)_{-\mu^2} \oplus (V^*)_{-\mu^3} \qquad (40)$$

В частности (в отличие от sl(2,C)) представление sl(3,C) и его дуальное, как правило, не изоморфны друг другу (даже веса в V и V* разные).

Теорема о наивысшем весе. Если найдено представление с весом $\mu=(m_1,m_2)$, то применяя корневые векторы X_1, X_2, X_3, Y_1, Y_2, Y_3, можно получить новые веса вида $\mu+\alpha$, где α – корень. Конечно, в случае $\pi(Z\alpha)v=0$, то $\mu+\alpha$ не обязательно является весом. Так как искомое представление конечномерно, то может быть только конечное число весов, и, следовательно, довольно часто получается ноль. По аналогии с классификацией представлений sl(2,C) в каждом представлении выделяется наивысший вес, а затем все остальные веса получаются из него. Для введенных корней $\alpha_1=(2,-1)$ и $\alpha_2=(-1,2)$ при сравнении двух весов, μ_1 и μ_2, принимается, что вес μ_1 больше μ_2, если разность их представляется в виде $\mu_1-\mu_2=a\alpha_1+b\alpha_2$ с $a\geq0$, $b\geq0$. Такое определение позволяет упорядочить все веса представления π алгебры sl(3,C), по старшинству и, тем самым, выделить единственный наибольший вес μ_0. Заметим, что отношение высшее – это только частичное упорядочение; то есть можно иметь такие μ_1 и μ_2, так что μ_1 не выше и не ниже μ_2. Например, $\alpha_1-\alpha_2$ не выше и не ниже 0. Это, в частности, означает, что конечный набор весов не обязательно должен иметь наивысший элемент (например, множество $\{0,\alpha_1-\alpha_2\}$ не имеет старшего элемента). Отметим также, что коэффициенты a и b не обязательно должны быть целыми числами, даже если и μ_1, и μ_2 имеют целочисленные элементы. Например, (1,0) больше, чем (0,0), поскольку $(1,0)=2/3\alpha_1+1/3\alpha_2$. Каждое неприводимое представление π алгебры sl(3,C) является прямой суммой весовых пространств, то есть $\pi(H_1)$ и $\pi(H_2)$ одновременно диагонализируемы в каждом неприводимое представление. Каждое неприводимое представление sl(3,C) имеет единственный старший вес μ_0, и два эквивалентных неприводимых представления имеют одинаковые старшие веса. Два неприводимых представления sl(3,C) с одинаковым старшим весом эквивалентны. Если π неприводимое представление sl(3,C), то старший вес представления π имеет вид $\mu_0=(m_1,m_2)$, где m_1 и m_2 – целые неотрицательные числа. Если m_1 и m_2 – целые неотрицательные числа, то существует неприводимое представление π группы sl(3,C) со старшим весом $\mu_0=(m_1,m_2)$. Упорядоченная пара (m_1,m_2), где m_1 и m_2 являются целыми неотрицательными числами, называется доминирующим целым элементом.

Заключение

В следующих статьях будем использовать весь арсенал теории представлений алгебр Ли sl(2,C), sl(3,C)и групп Ли SL(2,C), SL(3,C) для создания как самих новых алгебр Ли и групп Ли так и теории представлений на базе расширения поля бинарного комплексного числа до полей мультинарных комплексных чисел n=3,4,5,6,... с возможностями рассмотрения мультинарных неабелевых гиперкомплексных чисел [8,9]. Последние открывают путь построения мультинарных алгебр и групп, которые могут являться расширением Ли-алгебр и Ли-групп, например, помимо обсуждаемых бинарных Ли-коммутационных соотношений, в теории tsu(3) возникают тернарные коммутационные соотношения [8,9]:

$$[XYZ]=XYZ+jYZX+j^2ZXY. \qquad (41)$$

Литература

1. Kostrikin A. Alĝebra, Iv, IIv, IIIv, 2000.
2. Hall B.C. Lie ĝroups, Lie alĝebras / An elementary introduction, 2003. XIV. 354p.
3. Donaldson S.K. Lectures on Lie ĝroups and ĝeometry, March 25, 2011.
4. Исаев А.П., Рубаков В.А. Теория групп и симметрий: Конечные группы. Группы и алгебры Ли. М.: URSS, 2018. 504 с.
5. Kalle Kytola. Finite ĝroups, Lie ĝroups, Lie alĝebras, and representation theory, 2020.
6. Koerber C. Lie Alĝebra Representation Theory –SU(3)-Representations in Physics, North Carolina State University, Department of Mathematics, 2013.
7. Weiyi Zhanĝ. Lie Ĝroups, Mathematics Institute, University of Warwick, 2018.
8. Царьков А.Н., Смуров С.В., Волков Г.Г. Тернарные неабелевы симметрии о запутывании многомерных пространств // Известия Института инженерной физики, 2020. №2(56) С. 74-81.
9. Смуров С.В., Волков Г.Г., Столбов С.Н., Царьков А.Н. Новые симметрии многомерной геометрии в квантовой физике и квантовой информации // Известия Института инженерной физики, 2020. №3(57). С. 85-94.

УДК 621.867.87

СИГНАЛЫ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВАМИ ПНЕВМОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ

SIGNALS AND ALGORITHMS FOR CONTROLLING DEVICES OF THE PNEUMATIC TRANSPORTATION SYSTEM

Александр Михайлович Кабышев
кандидат технических наук, доцент
доцент кафедры «Промышленная электроника (ПЭ)»
ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет) (СКГМИ (ГТУ)»
Адрес: 362021, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Николаева, д. 44
Тел.: 8 (905) 488-62-43, 8 (919) 423-34-22
E-mail: al.kab.56@yandex.ru

Валерий Васильевич Хмара
доктор технических наук, профессор
профессор кафедры ПЭ
ФГБОУ ВО СКГМИ (ГТУ)
E-mail: khmaraval@yandex.ru

Максим Петрович Маслаков
кандидат технических наук, доцент
заведующий кафедрой ПЭ
ФГБОУ ВО СКГМИ (ГТУ)
E-mail: kalbash1@mail.ru

Борис Дзамболатович Хасцаев
доктор технических наук, профессор
профессор кафедры ПЭ
ФГБОУ ВО СКГМИ (ГТУ)
E-mail: bordsamchas@rambler.ru

Светлана Викторовна Кулакова
старший преподаватель кафедры ПЭ
ФГБОУ ВО СКГМИ (ГТУ)
E-mail: kylakova_07@mail.ru

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы управления устройствами, входящими в систему пневматической контейнерной доставки технологических материалов. Разработана структурная схема транспортной системы. Предложены и рассмотрены конструктивные особенности устройств пневмотранспортной системы. Разработана схема микропроцессорной системы, предназначенной для управления механизмами устройств пневмотранспортной системы. Выполнена оптимизация сигналов, обеспечивающих взаимодействие механизмов устройств, транспортной системы. Разработаны структурные схемы алгоритмов управления механизмами устройств пневмотранспортной системы на примере станций загрузки и разгрузки технологических материалов.

Ключевые слова: технологический материал, химический состав, контейнерная доставка, транспортная система, микропроцессорная система, алгоритмы, датчики, сигналы, пневмоцилиндры.

Summary

The article discusses the issues of management of devices included in the system of pneumatic container delivery of technological materials. A structural circuit of the transport system has been developed. The structural features of the plug-in devices are proposed and considered. A diagram of a microprocessor system designed to manage the mechanisms of devices of the pneumatic transport system. Optimization of signals ensuring the interaction of the mechanisms of devices, the transport system. Structural schemes of control algorithms for the mechanisms of the pneumatic transport system are developed on the example of the stations of loading and unloading technological materials.

Keywords: technological material, chemical composition, container shipping, transport system, microprocessor system, algorithms, sensors, signals, pneumatic cylinders.

Введение

На современных металлургических и обогатительных предприятиях информацию о химическом составе технологического сырья и готовой продукции получают в автоматизированных системах аналитического контроля (АСАК). При этом для транспортировки проб химических материалов, как правило, используются контейнерные пневмотранспортные системы [1-3], работающие в автоматическом режиме. Пневмотранспортные системы также применяются для доставки исходного сырья к месту проведения технологических процессов [2,4].

Преимущество контейнерных пневмотранспортных систем по сравнению с другими способами доставки грузов состоит в том, что они практически не оказывают отрицательного влияния на экологическую обстановку в районе рас-

положения транспортной системы, так как исключается контакт транспортируемых вредных материалов с окружающей средой [5,6].

В состав пневмотранспортных систем, работающих в автоматическом режиме, входят следующие основные устройства [7-10]:

- станции для автоматической загрузки технологических материалов в транспортный контейнер и отправки контейнера в химическую экспресс-лабораторию или к месту проведения технологического процесса;
- система транспортных трубопроводов;
- станции автоматической разгрузки доставленных материалов и автоматического возврата порожнего транспортного контейнера к месту отбора технологических материалов.

В протяженных и разветвленных транспортных системах применяются промежуточные станции, а для изменения направления движения контейнеров используются стрелочные переводы [11, 12].

Основной раздел

На основании выше отмеченного, была разработана, показанная на *рисунке 1*, структурная схема системы пневмотранспортной контейнерной доставки технологических материалов.

На *рисунке 1* приняты обозначения:

- СЗ – станция автоматической загрузки материалов;
- СР – станция автоматической разгрузки;
- СУ – системы управления станциями;
- К – компрессоры станций;
- ДК1, ДК2– блоки, в состав которых входит датчик положения контейнера и электроклапан, герметизирующий транспортный трубопровод, открытое состояние клапана является его нормальным (исходным) состоянием.

На *рисунке 1* жирными стрелками показано направление движения технологического материала.

Работа системы заключается в следующем. На станции загрузки (СЗ), технологический материал загружается в транспортный контейнер из системы «дозированной загрузки» (на рисунке эта система не показана). Процесс загрузки инициируется сигналом «готов», формируемым в СЗ.

Под действием давления сжатого воздуха, вырабатываемого компрессором (К), транспортный контейнер по трубопроводу доставляется на станцию разгрузки (СР), где происходит разгрузка технологического материала в систему «приема материала» (на рисунке эта система не показана). Порожний транспортный контейнер возвращается в исходную точку (на станцию СЗ).

Системы управления (СУ), формируют сигналы управления механизмами соответствующих станций, управляют процессом транспортировки контейнера. В каждую СУ поступают сигналы «пуск» из систем «дозированной загрузки» и «приема материалов». Эти сигналы инициируют процессы отправки контейнера.

На концевых участках транспортного трубопровода установлены блоки ДК, которые предназначены для создания воздушной «подушки» под контейнером, движущимся под действием силы тяжести по одному из наклонных участков трубопровода. Датчики блоков ДК посылают

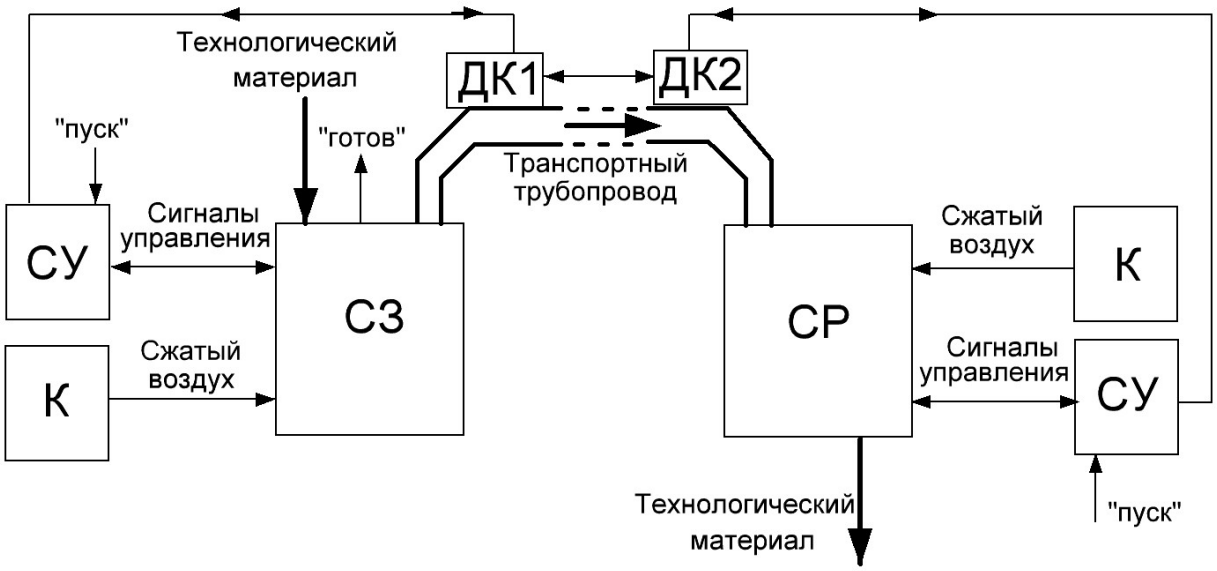


Рис.1. Структурная схема системы пневмотранспортной, контейнерной доставки технологических материалов

сигналы в СУ в моменты прохождения контейнера из горизонтального участка транспортного трубопровода в наклонные участки. Электроклапан блоков ДК закрывается сигналом из СУ станции, отправившей контейнер, и открывается при поступлении в СУ станции, принимающей контейнер, сигнала о приближении контейнера к станции. Одновременно прекращается подача в транспортный трубопровод транспортирующего сжатого воздуха, при этом снижается давление воздуха в горизонтальном участке транспортного трубопровода и контейнер плавно опускается по вертикальному участку трубопровода в соответствующую станцию.

На *рисунках 2, 3* показаны функциональные схемы станций загрузки и разгрузки транспортных контейнеров. Станции выполнены по единому принципу из унифицированных узлов.

На рисунках приняты следующие обозначения:

- ПЦ1, ПЦ2, ПЦ3 – пневмоцилиндры;
- РСВ1, РВС2, РВС3 – распределители сжатого воздуха, предназначены для изменения направления подачи сжатого воздуха в штуцеры пневмоцилиндров, при этом, изменяется направление движения штоков пневмоцилиндров;
- Д1, Д2, Д3, Д4, Д5, Д6 – датчики положения штоков пневмоцилиндров;
- Д7 – датчик поступления контейнера в станцию;
- КВ1 – клапан подачи транспортирующего сжатого воздуха.

На штоке пневмоцилиндра ПЦ1 жестко закреплены направляющие, обеспечивающие свободное перемещение в вертикальном направлении приемного стакана, с находящимся в нем транспортным контейнером. Пневмоцилиндр ПЦ1 предназначен для горизонтального перемещения контейнера внутри станций. Пневмоцилиндры ПЦ2, ПЦ3 служат для вертикального перемещения приемного стакана с транспортным контейнером.

При верхнем положении штока пневмоцилиндра ПЦ2 станции загрузки (*рисунок 2*) клапан контейнера упирается в выступ узла загрузки технологического материала и открывается. Датчик Д3 срабатывает при верхнем положении штока ПЦ2 и формирует сигнал «готов», ин-

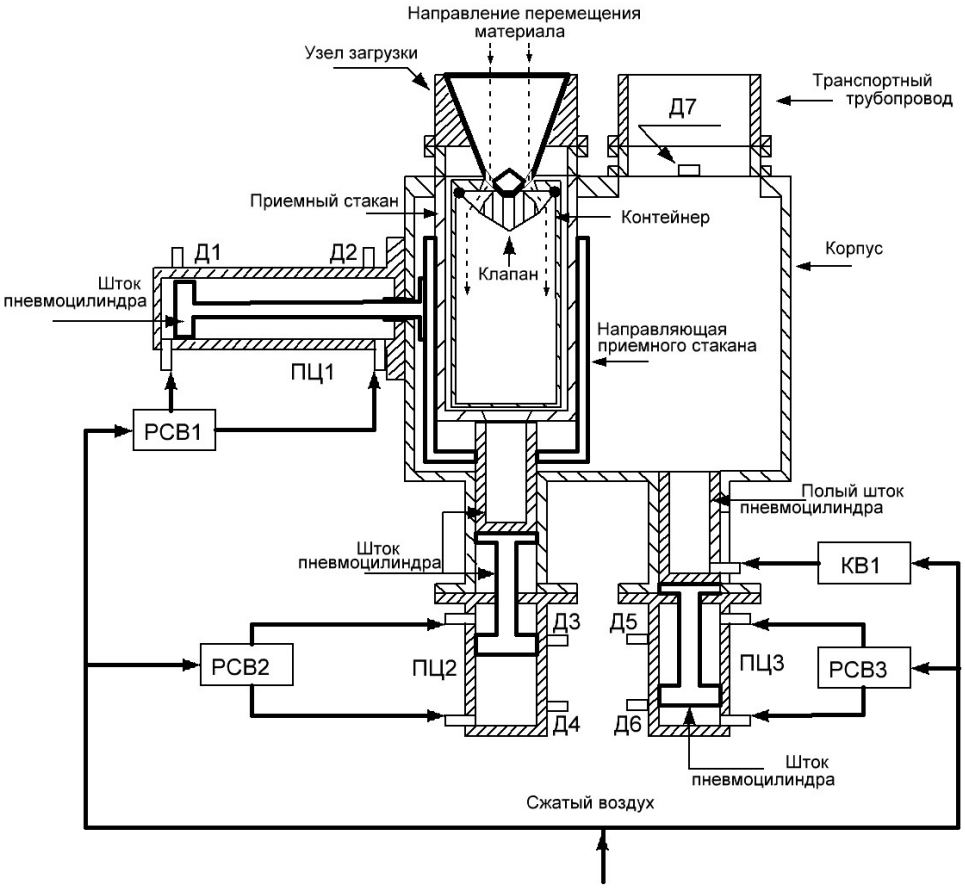


Рис. 2. Функциональная схема станции загрузки (СЗ) технологических материалов

формирующий систему «дозированной загрузки» о готовности СЗ к приему технологического материала. Сыпучий технологический материал из системы «дозированной загрузки» поступает в транспортный контейнер. При опускании штока ПЦ2 в нижнее положение, опускается приемный стакан с контейнером и клапан закрывается.

Перемещении штока ПЦ1 в крайнее правое положение приводит к перемещению приемного стакана с загруженным контейнером под транспортный трубопровод. Шток ПЦ3 перемещаясь в верхнее положение, поднимает стакан с контейнером, обеспечивается герметизация приемного стакана и транспортного трубопровода. Это положение контролируется датчиком Д5, по сигналу от которого закрывается клапан блока ДК1 (*рисунок 1*). При открывании клапана КВ1 транспортирующий сжатый воздух через полый шток ПЦ3 поступает под контейнер и выполняется процесс транспортировки контейнера по трубопроводу в станцию разгрузки материала. Клапан КВ1 закрывается, если контейнер достиг противоположного конца транспортного трубопровода при поступлении сигнала от датчика блока ДК2 (*рисунок 1*).

Верхнее положение штока ПЦ3 сохраняется для приема порожнего контейнера, движущегося от станции разгрузки. При приближении контейнера к станции СЗ открывается клапан блока ДК1 (*рисунок 1*), снижается давление сжатого воздуха в транспортном трубопроводе, а так как обеспечена герметизация между приемным стаканом станции СЗ и транспортным трубопроводом, то перед контейнером создается воздушная «подушка» и происходит плавное поступление контейнера в приемный стакан. Контейнер пересекает зону, контролируемую датчиком Д7 и запускается процесс перемещения контейнера под узел загрузки: опускается шток ПЦ3, шток ПЦ1 перемещается в крайнее левое положение, шток ПЦ2 устанавливается в крайнее верхнее положение (*рисунок 2*). Таким образом, повторяется процесс загрузки и отправки контейнера.

Описанные выше процессы приема и отправки контейнера характерны и для станции разгрузки, показанной на *рисунке 3*. Отличие между станциями состоит в следующем: перед моментом подачи транспортирующего сжатого воздуха (момент отправки контейнера) закрывается клапан блока ДК2 (*рисунок 1*); открывается клапан ДК2 в моменты приема контейнера станцией СР; подача транспортирующего сжатого воздуха прекращается при поступлении сигнала от датчика блока ДК1. Кроме того, перемещение штока пневмоцилиндра ПЦ3 возможно только

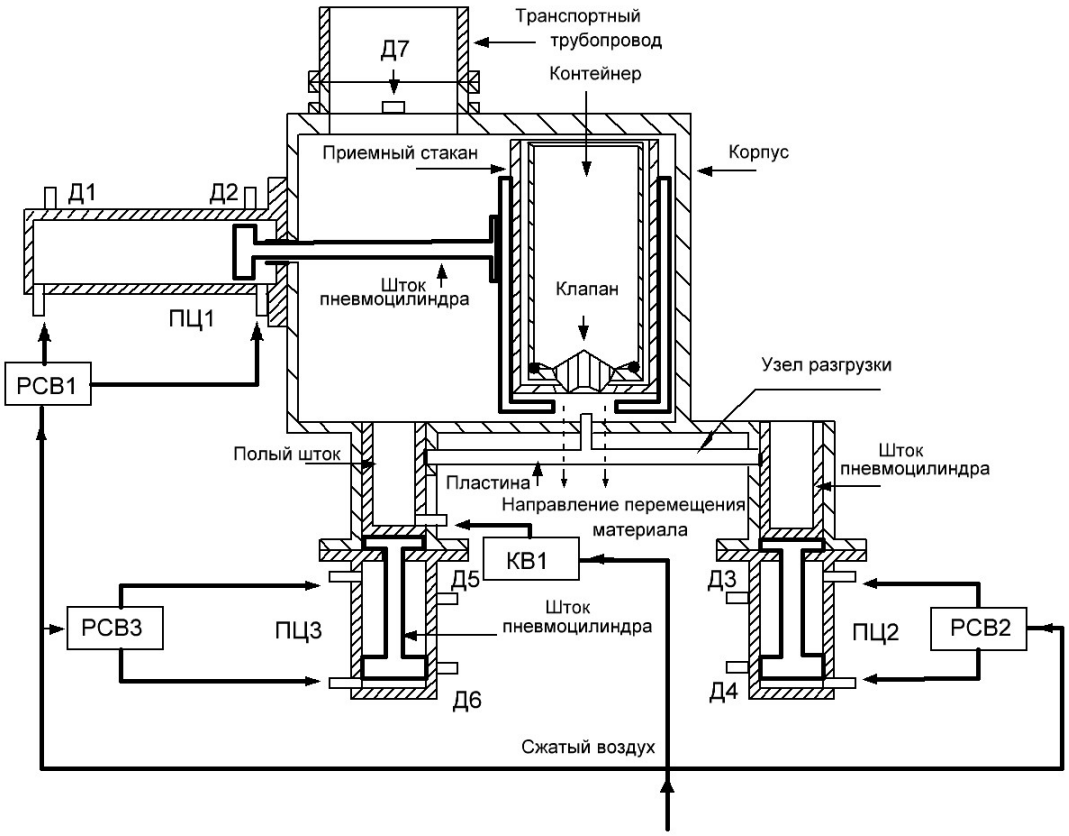


Рис. 3. Функциональная схема станции разгрузки (СР) технологических материалов

при синхронном перемещении штока пневмоцилиндра ПЦ2. Связано это с тем, что узел разгрузки технологического материала станции СР, как показано на *рисунке 3* состоит из пневмоцилиндров ПЦ3, ПЦ2, между штоками которых жестко закреплена металлическая пластина. При перемещении штоков ПЦ3 и ПЦ2 в верхнее положение выступ пластины упирается в клапан контейнера, открывает его и выполняется разгрузка контейнера.

Схемотехнические решения рассмотренных станций и принцип их работы организованы таким образом, чтобы информационные и управляющие сигналы выполняли одинаковые функции. Это позволило разработать универсальную систему, предназначенную для управления механизмами станций. Схема системы управления показана на *рисунке 4*. Из которого видно, что в состав схемы входит микроконтроллер DD1 семейства PIC фирмы «MicroChip», параллельный адаптер DD2 и шинный формирователь DD3, повышающий нагрузочную способность выводов адаптера. Информационные сигналы, формируемые датчиками станций (Д1-Д8), сигнал «пуск» и сигналы блоков ДК поступают на выводы портов адаптера DD2 через контакты разъема XS1.

Если станция работает в режиме отправки контейнера по транспортному трубопроводу, то в СУ приходит два информационных импульса ДК. Первый импульс формируется датчиком ближнего к станции, отправившей контейнер, блока ДК, второй импульс формируется дальним блоком ДК и является информацией о том, что контейнер доставлен в станцию, принимающую контейнер, и при этом необходимо отключить подачу транспортирующего сжатого воздуха. Если станция работает в режиме приема

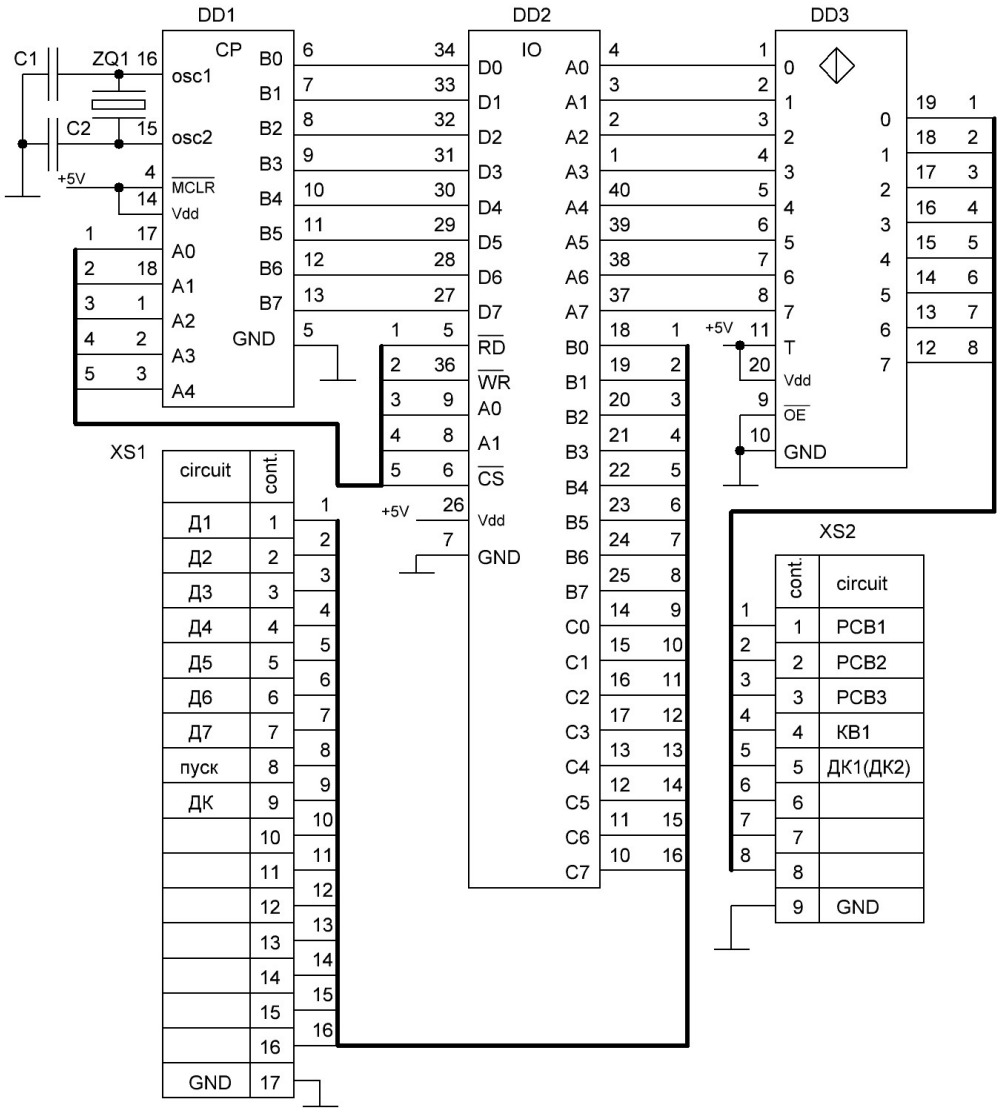


Рис. 4. Принципиальная схема системы управления

контейнера, то второй импульс ДК, сформированный ближним к станции блоком ДК, информирует ее о доставке контейнера, при этом необходимо открыть клапан в этом блоке ДК для сброса давления транспортирующего сжатого воздуха и создания под контейнером воздушной «подушки».

Сигналы, управляющие механизмами станций, формируются на выводах разъема XS2. Если все сигналы управления, на выводах разъема XS2, принимают значение напряжения низкого уровня (0В), то это приводит к следующему состоянию механизмов станции: шток ПЦ1 переводится в крайнее левое положение; штоки ПЦ2 и ПЦ3 принимают крайние нижние положения; закрывается клапан КВ1; открывается клапан ближнего к станции блока ДК. В такое состояние механизмы станций переводятся перед началом работы.

Высокие уровни управляющих сигналов (+5В) приводят к действиям противоположным действиям, описанным выше.

На *рисунке 5* показана схема алгоритма работы системы управления при управлении механизмами станции С3.

В схеме алгоритма блоки 1,2,3,4 управляют процессом загрузки контейнера технологическим материалом. Блоки с 5 по 15 контроли-

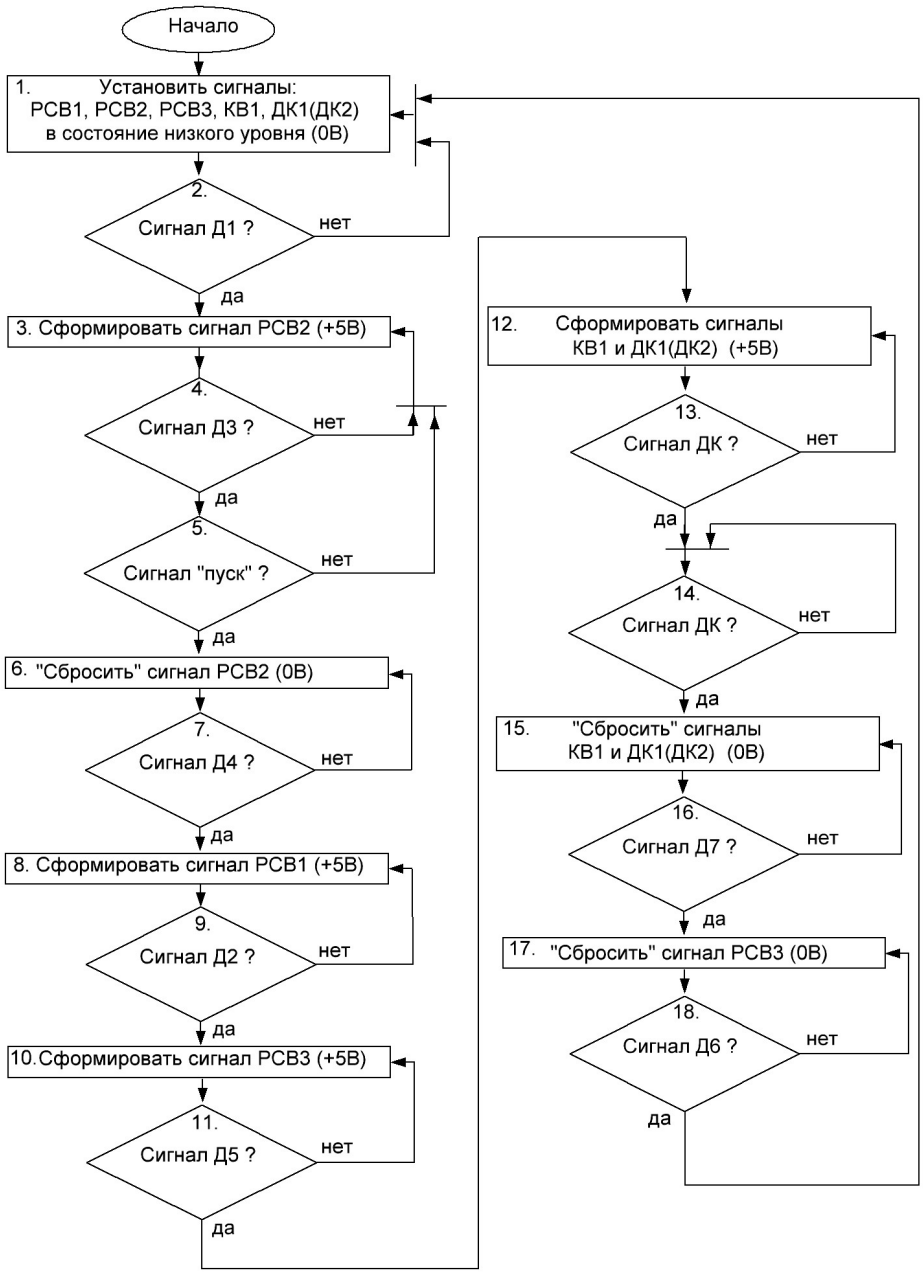


Рис. 5. Схема алгоритма управления станцией загрузки

руют отправку контейнера по транспортному трубопроводу в станцию СР. В блоках 16, 17, 18 используются сигналы, реализующие операцию приема порожнего контейнера из станции СР.

На *рисунке 6* показана схема алгоритма работы системы управления при управлении механизмами станции СР.

В этой схеме блоки, имеющие номера с 1 по 7 обрабатывают и формируют сигналы необходимые для приема груженого контейнера из станции СЗ. Блоки 8, 9, 10 управляют процессом разгрузки контейнера. Блоки с 11 по 21 предназначены для управления процессом отправки порожнего контейнера в станцию СЗ.

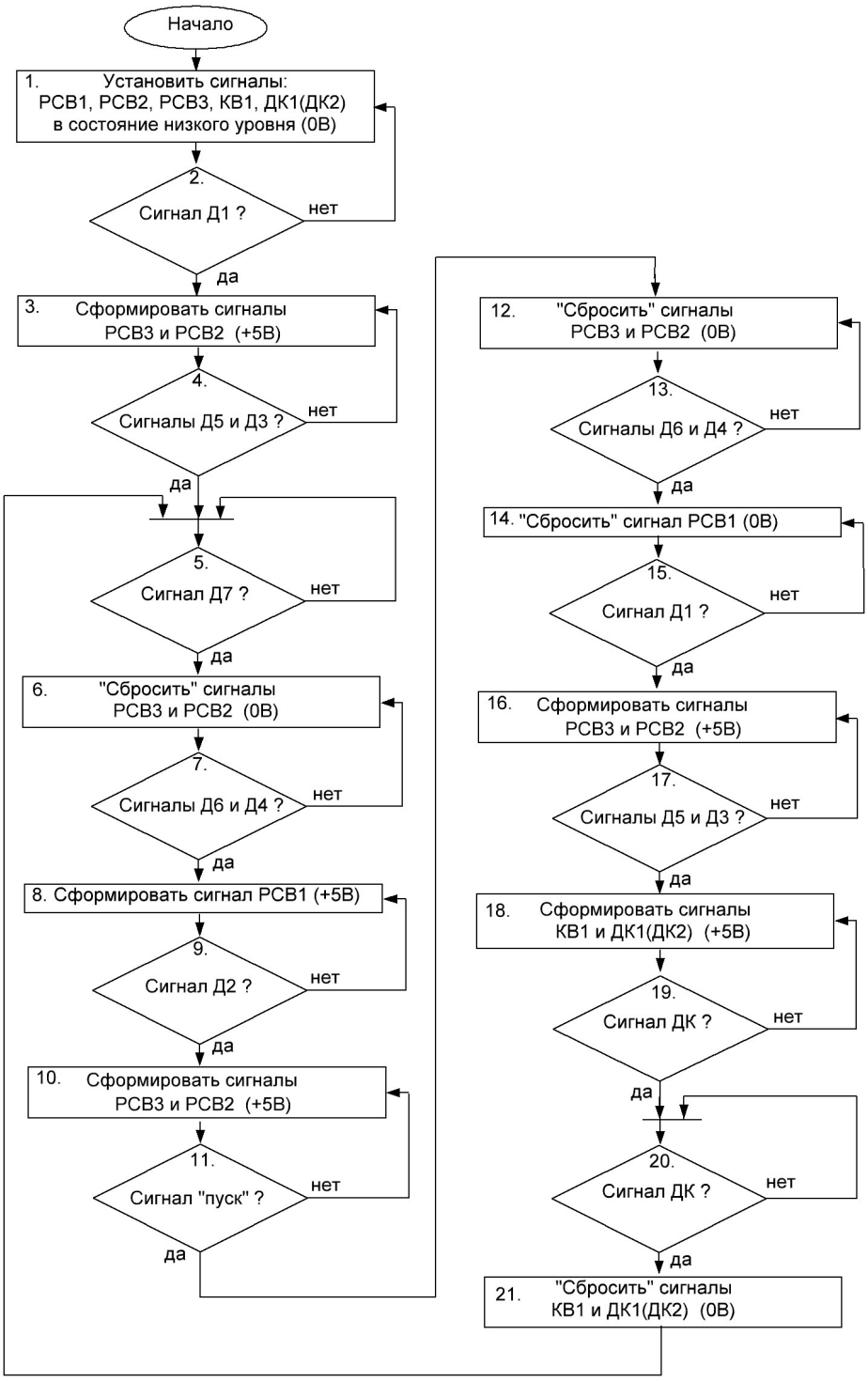


Рис. 6. Схема алгоритма управления станцией разгрузки

Заключение

Рассмотренные в статье схемы и алгоритмы могут быть использованы при разработке автоматических пневмотранспортных систем, предназначенных для доставки небольших объемов сыпучих материалов в технологических процессах металлургической, пищевой и химической промышленности.

Литература

1. LobotskyY.G, KhmaraV.V, KabyshevA.M, DedegkaevA.G. The Principles of complex systems of container pneumatic transport with the use of universal switches // Modern Applied Science. Canada. Vol. 9, № 5. 2015. P. 228-246.
2. Волошин А.И., Пономарев Б.В. Механика пневмотранспортирования сыпучих материалов. Киев: Наукова думка, 2001. 521 с.
3. Евтюков С.А., Шапунов М.М. Справочник по пневмокомплексам и пневмотранспортному оборудованию. Спб.: ДНК, 2005. 456 с.
4. Маслаков М.П., Хмара В.В., Кабышев А.М. Разработка унифицированного модуля с микропроцессорной системой управления для контейнерного пневмотранспорта // Инженерный вестник Дона, 2019. №9(60). С.31.
5. Кузина Е.Л. Особенности влияния транспортных факторов на эколого-экономическую безопасность страны // Инженерный вестник Дона, 2012. № 1.
6. Васильев А.С., Романов А.В., Щукин П.О. Перспективные направления создания экологически безопасных транспортно-упаковочных комплектов для перевозки и хранения отработавшего ядерного топлива // Инженерный вестник Дона, 2012. №3(21). С.137-141.
7. Mills D., Agarwal V.K. Pneumatic conveying systems.Trans tech publications, 2001. 345 p.
8. Kril S.I., Semenenko E.V. Calculation of pneumatic transport parameters of sands from gravel and technogenerous deposits // Metallurgy and metal mining industry, 2006. №35. P.77-80.
9. Kosugi S., Saitou K., N. Matsui and Y. Tomita. Development of Vertical Pneumatic Capsule Pipeline System for Deep Underground// 2-nd International Symposium on Underground Freight Transportation by Capsule Pipelines and Other Tube/Tunnel Systems, 2000.
10. Sandor Tatay, Endre Magoss, Szilard Kazmer. Condition monitoring and fault diagnostic of the pneumatic conveying systems // International Scientific Conference on Sustainable Development & Ecological Footprint, 2012. Sopron: Hungary. Pp. 1-4.
11. Khmara V.V., Kabyshev A.M., Lobotskiy Y.G. Optimization of control for the pneumatic container transport. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2020. T.641 LNEE. C.315-322.
12. Khmara V.V., Lobotskiy Y.G., Kabyshev A.M. Microprocessor control of devices systems of pneumatic container delivery for the analysis of samples of concentrating and metallurgical production. 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing ICIEAM 2016 – Proceedings.

УДК 519.725

МЕТОД ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

INFORMATION PROTECTION METHOD

Александр Алексеевич Павлов
доктор технических наук, профессор
профессор кафедры
филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел.: 8 (4967) 72-19-11
E-mail: pavlov_iif@mail.ru

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

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

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

Александр Юрьевич Романенко
кандидат технических наук
соискатель

Аннотация

Изложена регулярная процедура кодирования информации для коррекции одиночных и обнаружения двойных ошибок при сокращении информационной избыточности на один проверочный разряд и, следовательно, аппаратурных затрат, связанных с хранением значений проверочных разрядов в устройстве памяти. Выявлены закономерности, позволяющие, при декодировании, формировать дополнительную проверку признака ошибки для определения ошибочных разрядов при возникновении неразличимых синдромов ошибок, вызванных сокращением основных проверочных разрядов. Получены математические выражения для оценки параметров разработанного кода. Проводится сравнительная оценка обнаруживающей способности и информационной избыточности предлагаемого метода с модифицированным кодом Хэмминга на примере кодирования 11-разрядного информационного слова. Установлено, что для кода (15,11) реализация предлагаемого метода позволяет обнаруживать 100% одиночных ошибок, а из 105 возможных одиночных и двойных ошибок, не обнаруживается 7 двойных ошибок (что составляет 6,66%) и использовать четыре проверочных разряда (на один проверочный разряд меньше, чем у модифицированного кода Хэмминга). Сокращение информационной избыточности позволяет повысить скорость кода и сократить аппаратурные затраты, связанные с хранением значений данного разряда в запоминающем устройстве.

Ключевые слова: корректирующий линейный код, информационные разряды, проверочные разряды, синдром ошибки, одиночные и двойные ошибки, информационная избыточность.

Summary

A regular procedure for coding information for correcting single errors and detecting double errors is described while reducing information redundancy by one check bit and, therefore, hardware costs associated with storing check bit values in a memory device. Regularities are revealed that allow, during decoding, to form an additional check of the error sign to determine the erroneous digits in the event of indistinguishable error syndromes caused by the reduction of the main check digits. Mathematical expressions for evaluating the parameters of the developed code are obtained. A comparative assessment of the detecting ability and information redundancy of the proposed method with a modified Hamming code is carried out on the example of encoding an 11-bit information word. It was found that for the code (15,11), the implementation of the proposed method allows detecting 100% of single errors, and out of 105 possible single and double errors, 7 double errors are not detected (which is 6,66%) and four check digits are used (for one check bit less than the modified Hamming code). Reducing information redundancy allows you to increase the code rate and reduce the hardware costs associated with storing the values of a given bit in the memory device. Key words: correcting linear code, information bits, check bits, error syndrome, single and double errors, information redundancy.

Keywords: correcting linear code, information bits, check bits, error syndrome, single and double errors, information redundancy.

Введение и постановка задачи

Запоминающие устройства (ЗУ) находят широкое применение в вычислительных, управляющих и передающих системах. Так как выдача ошибочной информации может привести может привести к аварийной ситуации, а в ряде случаев, к катастрофическим последствиям, то возникает необходимость повышения отказоустойчивости и достоверности функционирования данных устройств. Идеи использования кодов для

повышения надежности и достоверности функционирования устройств хранения и передачи информации, заложенные в трудах К.Шеннона, Дж.Ф. Неймана, Р.В. Хемминга, А.М. Гаврилова, А.Д. Закревского, получили развитие в работах ученых [1-11].

Опыт эксплуатации показывает, что в ЗУ наиболее вероятно возникновение одиночных и двойных ошибок. Так, одиночные ошибки появляются с вероятностью до 80%, двойные – до 20-25%, а на ошибки прочей кратности приходится до 2% [2-3]. В настоящее время в рассматриваемых системах наиболее широко используется код Хемминга корректирующие одиночные ошибки, имеющий минимальное кодовое расстояние $d=3$.

Для коррекции одиночных ошибок и обнаружения двойных ошибок используется модифицированный код Хемминга, обнаруживающий двойные ошибки, имеющий минимальное кодовое расстояние $d=4$ и использующий для этой цели дополнительную проверку на четность. Использование дополнительной проверки на четность приводит к увеличению информационной и аппаратурной избыточности, что ведет к снижению эффективности применения кода. Таким образом, существует необходимость разработки корректирующих кодов, исправляющих одиночные ошибки и обнаруживающих двойные ошибки при минимальной информационной избыточности.

Правила построения кодов, корректирующих одиночные ошибки и обнаруживающих двойные ошибки, при минимальной информационной избыточности

Правило 1. Двоичное слово Y, содержащее k информационных символов, разбивается на два информационных блока $k_1=k_2$ (пусть k кратно двум).

Правило 2. Определяется число проверочных разрядов для одного информационного блока: $r=log_2 k_1$.

Правило 3. Строится проверочная матрица H, включающая $k+r$ столбцов всех ненулевых векторов длины r:

$$H = \left| \begin{array}{ccc} r_r \ldots r_2\ r_1 & y_1\ y_2\ y_3\ y_4\ y_5\ \ldots\ y_k \\ 0 \ldots 0\ 1 & 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ \ldots\ 1 \\ 0 \ldots 1\ 0 & 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ \ldots\ 1 \\ \ldots\ldots & \ldots\ldots \\ 1 \ldots 0\ 0 & 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ \ldots\ 1 \end{array} \right| .$$

Правило 4. Проверки для формирования значений проверочных разрядов определяются суммированием по *mod2* элементов строк проверочной матрицы H, имеющих единичные значения.

Следствие 1. Число повторений одного и того же столбца в проверочной матрице H равно двум.

Свойство 1. Рассматриваемый код позволяет обнаруживать все одиночные ошибки.

Свойство 2. Одиночные ошибки, принадлежащие повторяющимся столбцам, имеют одинаковые значения синдромов ошибок, в результате имеем $(k+r)/2$ – неразличимых синдромов ошибок.

Для выявления любой комбинации одиночных ошибок необходимо и достаточно, чтобы все столбцы проверочной матрицы были различны.

Правило 5. Разобьем множество столбцов порождающей матрицы H на два подмножества, содержащих равное количество элементов: $M=\{m_1 m_2 \ldots m_q\}$ и $Z=\{z_1 z_2 \ldots z_{(q-r)} r_1 \ldots r_r\}$, содержащих по $(k+r)/2$ неповторяющихся столбцов, где $m_i(z_i)$ значения информационных разрядов y_i, принадлежащих соответствующим подмножествам неповторяющихся столбцов.

Правило 6. Чтобы синдромы ошибок стали различимы, сформируем проверку, представляющий собой сумму по *mod2* элементов множества M (не содержащего проверочных разрядов кодового набора):

$$r_M = m_1 \oplus m_2 \oplus \ldots \oplus m_q,$$

В результате получим код с минимальным кодовым расстоянием $d=3$. При считывании из запоминающего устройства, кодовый набор передается в виде:

$$Y_K = y_1^g\ y_2^g\ y_3^g\ \ldots\ y_k^g\ \ r_1^g r_2^g\ \ldots\ r_r^g r_M^g.$$

При сложении по *mod2* значений одноименных проверочных разрядов $r_1^g \ldots r_r^g\ r_M^g$, считываемых из запоминающего устройства, с проверочными разрядами $r_1^f \ldots r_r^f r_M^f$, сформированными относительно принятых информационных разрядов (по *правилу 4*), получим значения синдромов ошибки E_i, позволяющих корректировать одиночную ошибку:

$$\begin{array}{c} r_1^g\ \ldots.\ r_r^g\ r_M^g \\ \oplus\ \underline{r_1^f\ \ldots.\ r_r^f\ r_M^f} \\ e_1\ \ldots\ e_r\ e_m \end{array}$$

Для обнаружения и коррекции двойных ошибок при декодировании, сформируем три дополнительных проверки, используя следующие правила:

Правило 7. Для формирования первой дополнительной проверки r_Z^f, осуществим сложение по *mod2* элементов множества Z с сформированными значениями проверочных разрядов:

$$r_Z^f = z_1 \oplus z_2 \oplus \ldots \oplus z_{(q-r)}\ r_1^f \oplus r_2^f \oplus \ldots \oplus r_r^f,$$

где z_i – значения принятых информационных разрядов y_i^g, не вошедших в множество M.

Правило 8. Для формирования второй дополнительной проверки r_Z^e, осуществим сложение

по *mod*2 элементов множества Z с полученными значениями разрядов синдромов ошибок, без учета значения разряда e_m:

$$r_Z^e = z_1 \oplus z_2 \oplus \ldots \oplus z_{(q-r)}\, e_1 \oplus e_2 \oplus \ldots \oplus e_r.$$

Правило 9. Для формирования третьей дополнительной проверки $r_ч$, сформируем проверку на четность информационных разрядов принятого кодового набора и добавим к полученному результату значения сформированных проверочных разрядов r_i^f (без учета значения разряда r_M^f)

$$r_ч = y_1^g \oplus y_2^g \oplus y_3^g \oplus \ldots \oplus y_k^g \oplus r_1^f \oplus r_2^f \oplus \ldots \oplus r_r^f.$$

В результате получим дополненный синдром ошибки, включающий следующие значения проверок:

$$E = \{e_1 e_2 \ldots e_r\, e_m\, r_Z^f\, r_Z^e\, r_ч\}.$$

Свойство 3. Множество синдромов ошибок E включает три подмножества синдромов ошибок: $|E_1|$ – для коррекции одиночных ошибок кодового набора; $|E_2|$ – для обнаружения двойных ошибок; $|E_3|$ – для коррекции двойных ошибок, для которых выполняется условие:

$$E_1 \cap E_2 \cap E_3 = \varnothing.$$

В результате имеем *таблицу 1* декодирования.

Пример. Допустим, кодовый набор имеет три основных контрольных разряда ($r_r = 3$).

В этом случае проверочная матрица H содержит 14 столбцов:

$$H = \left|\begin{array}{ccc ccc ccc ccc cc}
r_3 & r_2 & r_1 & y_1 & y_2 & y_3 & y_4 & y_5 & y_6 & y_7 & y_8 & y_9 & y_{10} & y_{11} \\
0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1
\end{array}\right|.$$

Число повторений одного и того же столбца в проверочной матрице H равно двум.

Проверки для формирования значений основных проверочных разрядов определяются как:

$$r_1 = y_3 \oplus y_6 \oplus y_7 \oplus y_8 \oplus y_9 \oplus y_{10} \oplus y_{11};$$
$$r_2 = y_2 \oplus y_4 \oplus y_5 \oplus y_8 \oplus y_9 \oplus y_{10} \oplus y_{11};$$
$$r_3 = y_1 \oplus y_4 \oplus y_5 \oplus y_6 \oplus y_7 \oplus y_{10} \oplus y_{11}.$$

Для указанного кода в *таблице 2* представлены значения синдромов при возникновении одиночных и двойных ошибок в информационных и контрольных разрядах относительно кодового слова:

$$\begin{array}{lcccccccccccc}
 & y_1 & y_2 & y_3 & y_4 & y_5 & y_6 & y_7 & y_8 & y_9 & y_{10} & y_{11} & r_1\ r_2\ r_3\ r_M \\
y_к = & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\ 0\ 0\ 0.
\end{array}$$

Для того, что бы сформировать первую дополнительную проверку r_M, находим неразличимые пары синдромов для одиночных ошибок, что соответствует следующим строкам *таблицы 2*:

1-14; 2-13; 3-12; 4-5; 6-7; 8-9; 10-11.

Тогда, первая и вторая дополнительные проверка имеют вид:

$$r_M = y_1 \oplus y_2 \oplus y_3 \oplus y_4 \oplus y_6 \oplus y_8 \oplus y_{10},$$
$$r_Z^f = r_1^f \oplus r_2^f \oplus r_3^f \oplus y_5^g \oplus y_7^g \oplus y_9^g \oplus y_{11}^g,$$

соответственно значение r_Z^e равно:

$$r_Z^e = e_1 \oplus e_2 \oplus e_3 \oplus y_5^g \oplus y_7^g \oplus y_9^g \oplus y_{11}^g.$$

Значение разряда e_m синдрома ошибки определяется выражением:

$$e_m = r_M^g \oplus r_M^f.$$

Проверка на четность определяется суммированием следующих элементов:

$$r_ч = y_1^g \oplus y_2^g \oplus y_3^g \oplus y_4^g \oplus y_5^g \oplus y_6^g \oplus$$
$$\oplus y_7^g \oplus y_8^g \oplus y_9^g \oplus y_{10}^g \oplus y_{11}^g \oplus$$
$$\oplus r_1^f \oplus r_2^f \oplus r_3^f.$$

Анализ таблицы синдромов позволяет сделать вывод о том, что синдромы одиночных ошибок отличаются от синдромов двойных ошибок, а часть синдромов двойных ошибок не совпадает с другими синдромами ошибок.

Заключение

Таким образом, предлагаемый код позволяет корректировать все одиночные ошибки, обнаруживать все двойные ошибки и, при этом, корректировать 27% двойных ошибок. Для обнаружения двойных ошибок не требуется построение модифицированного кода Хемминга (введения дополнительного разряда проверки на четность всего кодового набора), что позволяет повысить вероятность безотказной работы запоминающего устройства, повысить скорость кода и сократить аппаратурные затраты, связанные с хранением значения разряда проверки на четность в запоминающем устройстве.

Таблица 1

Таблица декодирования

Номера ошибочных разрядов	Группы синдромов ошибок	Значения разрядов синдромов ошибок		Значения дополнительных проверок			Корректируемые ошибки
		$e_1 \ldots e_r$	e_m	r_Z^e	r_Z^f	$r_ч$	
y_i	$\lvert E_1 \rvert$	$e_1 \ldots e_r$	e_m	r_Z^e	r_Z^f	$r_{чi}$	Коррекция одиночной ошибки y_i
$y_i y_j$	$\lvert E_2 \rvert$	$e_{1ij} \ldots e_{rij}$	e_{mij}	r_{Zij}^e	r_{Zij}^f	$r_{чij}$	Обнаруживаемые двойные ошибки $y_i y_j$
$y_i y_j$	$\lvert E_3 \rvert$	$e_{1ij} \ldots e_{rij}$	e_{mij}	r_{Zij}^e	r_{Zij}^f	$r_{чij}$	Коррекция двойных ошибок $y_i y_j$

Таблица 2

Таблица синдромов ошибок

№ п/п	Номера ошибочных разрядов	Группы синдромов ошибок	Значения разрядов синдромов ошибок		Значения дополнительных проверок			Корректируемые ошибки
			$e_1 \dots e_r$	e_m	r_Z^e	r_Z^f	$r_ч$	
1	y_1	$\lvert E_1 \rvert$	001	1	1	1	0	y_1
2	y_2		010	1	1	1	0	y_2
3	y_3		100	1	1	1	0	y_3
4	y_4		011	1	0	0	1	y_4
5	y_5		011	0	1	1	1	y_5
6	y_6		101	1	0	0	1	y_6
7	y_7		101	0	1	1	1	y_7
8	y_8		110	1	0	0	1	y_8
9	y_9		110	0	1	1	1	y_9
10	y_{10}		111	1	1	1	0	y_{10}
11	y_{11}		111	0	0	0	0	y_{11}
12	r_1		100	0	1	0	0	r_1
13	r_2		010	0	1	0	0	r_2
14	r_3		001	0	1	0	0	r_3
15	r_m^g		000	1	0	0	0	r_m^g
16	$y_2\ y_4$	$\lvert E_2 \rvert$	001	0	1	1	1	Обнаруживаемые двойные ошибки
17	$y_2\ y_5$		001	1	0	0	1	
18	$y_3\ y_6$		001	0	1	1	1	
19	$y_3\ y_7$		001	1	0	0	1	
20	$y_8\ y_{10}$		001	0	1	1	1	
21	$y_8\ y_{11}$		001	1	0	0	1	
22	$y_9\ y_{10}$		001	1	0	0	1	
23	$y_9\ y_{11}$		001	0	1	1	1	
24	$r_2 y_4$	$\lvert E_3 \rvert$	001	1	1	0	1	Корректируемые двойные ошибки
25	$r_2 y_5$		001	0	0	1	1	
26	$y_1\ r_m^g$		001	0	1	1	0	

Литература

1. Гребешков А.Ю. Микропроцессорные системы и программное обеспечение в средствах связи. Самара: ПГУТИ, 2009. 298 с.

2. Щербаков Н.С. Достоверность работы цифровых устройств. М.: Машиностроение, 1989. 224 с.

3. Щербаков Н.С. Самокорректирующиеся дискретные устройства. М.: Машиностроение, 1975. 214 с.

4. Павлов А. А., Царьков А. Н., Павлов П. А., Корсунский Д. А, Волков В.З. Обнаружение ошибок в запоминающих устройствах информационно-измерительных систем // Измерительная техника, 2017. №10. С.12-16.

5. Павлов А.А., Борисов К.Ю., Павлов П.А., Царьков А.Н., Хоруженко О.В. Метод построения линейных кодов, обнаруживающих и корректирующих ошибки в байтах информации //Метрология, 2011. №10. С.3-16.

6. Борисов К.Ю., Малофеев Ю.Г., Осипенко П.Н., Павлов А.А., Павлов П.А., Павлов А.А., Хоруженко О.В., Царьков А.Н. Патент на изобретение № 2448359 «Устройство хранения и передачи данных с исправлением ошибок в байте информации и обнаружением ошибок в байтах информации» от 05.04.2011 г.

7. Павлов А.А., Корсунский Д.А., Волков В.З. Структурно-кодовая защита устройств обработки информации // Известия Института инженерной физики, 2020. №1(55). С.84-92.

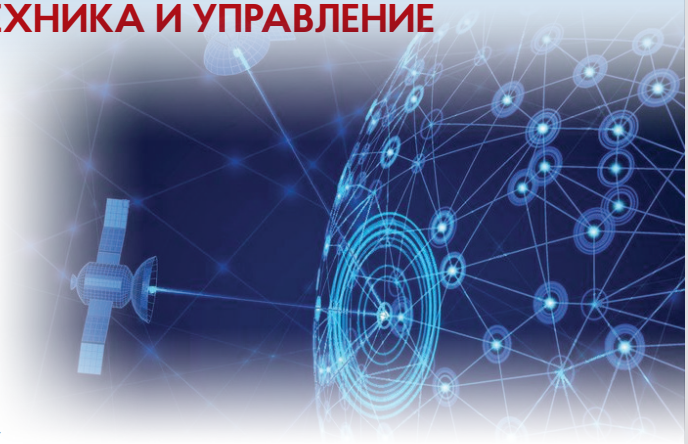
8. Павлов А.А., Неустроев С.С., Роберт И.В., Рягин С.Н, Царьков А.Н., Сорокин Д.Е., Бурмистров А.А., Иванов Д.Д. Обнаружение ошибок устройств хранения и передачи информации // Известия Института инженерной физики, 2016. №1(39). С.59-66.

9. Павлов А.А., Царьков А.Н., Роберт И.В., Павлов П.А., Сорокин Д.Е., Бурмистров А.А., Иванов Д.Д. Тестово-кодовая коррекции ошибок оперативных запоминающих устройств // Известия Института инженерной физики, 2015. №3(37) С.31-38

10. Павлов А.А., Царьков А.Н., Павлов А.А., Корсунский Д.А. Методический подход повышения достоверности функционирования устройств хранения и передачи информации с минимальной информационной и аппаратурной избыточностью // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика, 2017. № 5. С.47-53.

11. Павлов А.А., Волков В.З., Царьков А.Н., Корсунский Д.А. Методический подход повышения достоверности функционирования устройств обработки информации с минимальной информационной и аппаратурной избыточностью // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика, 2018. №6. С.30-37.

УДК 681.5.23



ПОТЕНЦИАЛЬНО ДОСТИЖИМАЯ ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЗИМУТА НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ДАННЫХ СИСТЕМЫ НАЗЕМНОЙ НАВИГАЦИИ, ЦИФРОВОЙ КАРТЫ ДОРОГИ И СРЕДСТВ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

POTENTIALLY ACHIEVABLE ACCURACY OF AZIMUTH ASSESSMENT IN THE INTEGRATED TERRAIN NAVIGATION SYSTEM AIDED BY DIGITAL ROAD MAP AND TECHNICAL VISION

Сергей Борисович Беркович
почетный геодезист РФ
доктор технических наук, профессор
начальник управления
навигационно-геодезических систем МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210 Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967) 35-31-93
E-mail: naviserp5@iifmail.ru

Алексей Викторович Шолохов
доктор технических наук, профессор
ведущий научный сотрудник управления
навигационно-геодезических систем МОУ «ИИФ»
Тел.: 8 (903) 579-75-94
E-mail: sholav@mail.ru

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

Аннотация
В статье проводится анализ двух вариантов коррекции азимутального канала навигационной системы. Первый основан на привлечении дополнительной информации о траекторном поле – цифровых карт дорог, второй – цифровых карт дорог и дополнительных измерениях бокового отклонения объекта от осевой линии дороги. Представлены результаты моделирования.
Ключевые слова: навигация, навигационная система счисления пути, азимутальный канал, цифровая карта дороги, система технического зрения.

Summary
The article analyzes two options for correcting the azimuth channel of the navigation system. The first one is based on attracting additional information about the trajectory field – digital road maps, the second - digital road maps and additional measurements of the lateral deviation of the object from the center line of the road. The simulation results are presented.
Keywords: navigation, dead reckoning system, azimuth channel, digital road map, vision system.

Введение

Выработка параметров ориентации является одной из основных задач, решаемых системами навигации подвижных объектов. Качество решения этой задачи для многих наземных объектов определяется не только характеристиками точности. Не менее важным являются затрачиваемое время и возможность определения ориентации без использования внешней по отношению к объекту информации.

Достижение высокого качества решения задачи азимутального ориентирования наземных объектов в настоящее время практически невозможно без использования дополнительной информации. При этом использование спутниковых систем навигации в составе автономных объектов недопустимо, что приводит к необходимости исследования путей привлечения данных цифровых карт дорог (ЦКД) и неэманативных средств технического зрения (СТЗ) [1-6].

Настоящая статья посвящена оценке потенциально достижимой точности определения азимута на основе комплексирования системы наземной навигации (СНН), ЦКД и СТЗ. Решение задачи получено на основе байесовского подхода к нахождению условных плотностей распределения навигационных и геодезических параметров. Синтезированы новые динамические модели погрешностей азимутальных параметров СНН, ЦКД и движения наземного объекта. Приведённые расчёты подтверждают принципиальную возможность достижения

среднеквадратичной ошибки (СКО) оперативного определения азимута на уровне нескольких угловых секунд в конечной точке маршрута движения наземного объекта автономными средствами.

Постановка задачи оценки потенциально достижимой точности определения азимута

Будем полагать, что объект движется по дороге, представленной в векторном формате в ЦКД в виде отрезков [1,4]. Каждый отрезок определяется координатами начальной ($B_н^к, L_н^к$) и конечной ($B_к^к, L_к^к$) точек, имеющими дисперсию D_K. Тогда дирекционный угол (ДУ) ориентации отрезка ЦКД можно представить в виде выражения

$$\alpha_K = \alpha_{ИСТ} + \Delta\alpha_K \qquad (1)$$

где $\Delta\alpha_K$ – погрешность дирекционного угла ЦКД.

В качестве математической модели погрешности ДУ ЦКД может быть использована известная экспоненциально-синусно-косинусная ковариационная функция (КФ) [4]:

$$k_{\alpha_K}(t) = 2\cdot\left(\frac{\sigma_K}{L_K}\right)^2\cdot e^{\left(\frac{-t\cdot V}{L_K}\right)}\cdot\left(\cos\left(\frac{2\cdot t\cdot V}{L_K}\right)-\frac{1}{2}\sin\left(\frac{2\cdot t\cdot V}{L_K}\right)\right), \qquad (2)$$

где V – скорость движения объекта;
L_K – протяженность отрезка ЦКД;
σ_K – СКО координат отрезка ЦКД;
$\omega_K, \sigma_{\omega_K} = \sqrt{2}\cdot\frac{V\cdot\sigma_K}{L_K^2}$ – СКО ДУ отрезка ЦКД.

Погрешность ДУ ЦКД можно описать во времени следующей системой дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \Delta\dot{\alpha}_K = \omega_K \\ \dot{\omega}_K = -5\cdot\left(\frac{V}{L_K}\right)^2\cdot\Delta\alpha + \left(-\frac{2\cdot V}{L_K}\right)\cdot\omega_K + 2\cdot V\cdot\frac{\sigma_K}{L_K^2}\cdot\sqrt{\frac{10\cdot V}{L_K}}\cdot\frac{W_K}{\sqrt{dt}}, \end{cases} \qquad (3)$$

где $W_K(t)$ – «белый» шум единичной интенсивности;
$\omega_K, \sigma_{\omega_K} = \sqrt{2}\cdot\frac{V\cdot\sigma_K}{L_K^2}$ – производная ДУ отрезка ЦКД и его СКО.

В то же время СНН при движении вырабатывает текущий ДУ объекта α_{CH}, точность которого зависит от СКО $\sigma_{\alpha 0}$ его начального значения α_{CH0} и дрейфа курсового гироскопа $\omega_Г$, случайной ошибки датчика ДУ $\Delta\alpha_Д$. Кроме того, движение объекта по дороге не является строго прямолинейным, а представляет собой некоторый колебательный процесс по углу рысканья объекта – азимутальные девиации $\Delta\alpha_P$. С учётом этого ДУ, вырабатываемый СНН:

$$\alpha_{CH} = \alpha_{ИСТ} + \Delta\alpha_{CH} + \Delta\alpha_P + \Delta\alpha_Д, \qquad (4)$$

Математическая модель дрейфа курсового гироскопа в данном случае представлена известной системой дифференциальных уравнений [5]:

$$\begin{cases} \Delta\dot{\alpha}_{CH} = \omega_Г \\ \dot{\omega}_Г = \frac{-1}{\tau_Г}\cdot\omega_Г + \sigma_{\omega_Г}\cdot\sqrt{\frac{2}{\tau_Г}}\cdot\frac{W_Г}{\sqrt{dt}}, \end{cases} \qquad (5)$$

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

Экспериментально установлено, что случайные азимутальные девиации объекта типа тяжелый трехосный тягач представляют собой стационарный случайный процесс, подчиненный нормальному закону распределения с вероятностью не ниже 0,95. Следовательно, в качестве математической модели девиаций может быть использована экспоненциально-синусно-косинусная КФ:

$$k_P(t) = \sigma_P^2\cdot e^{-t\cdot V\cdot\mu}\left(\cos(V\cdot\lambda\cdot t) - \frac{\mu}{\lambda}\sin(V\cdot\lambda\cdot t)\right), \qquad (6)$$

где σ_P – СКО случайных азимутальных девиаций равна 0,7…1,0 градус;
λ – преобладающая частота девиаций равна 0,05...0,1 м$^{-1}$;
μ – параметр затухания девиаций равен 0,005...0,015 м$^{-1}$ [4]. Ковариационной функции (6) соответствует система дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \Delta\dot{\alpha}_P = \omega_P \\ \dot{\omega}_P = -(\lambda^2+\mu^2)\cdot\Delta\alpha_P + (-2\cdot\mu)\cdot\omega_P + 2\cdot\sigma_P\cdot\sqrt{\mu\cdot(\lambda^2+\mu^2)}\cdot\frac{W_P}{\sqrt{dt}} \end{cases} \qquad (7)$$

где $W_P(t)$ – «белый» шум единичной интенсивности;
$\omega_P, \sigma_{\omega_P} = V\cdot\sigma_P\cdot\sqrt{\lambda^2 - 3\cdot\mu^2}$ – производная азимутальных девиаций и их СКО.

Таким образом, располагая моделями ДУ отрезка ЦКД (1), вырабатываемого навигационной системой ДУ (4), возможно определить погрешность азимутального канала как разность:

$$\alpha_{CH} - \alpha_K = \Delta\alpha_{CH} + \Delta\alpha_P - \Delta\alpha_K + \Delta\alpha_Д. \qquad (8)$$

Модель погрешностей интегрированной НС (НС плюс ЦКД) получается объединением дифференциальных уравнений (3), (5), (7). Искомая оценка ДУ интегрированной НС и его СКО находятся по известным соотношениям фильтра Калмана [5,8,9].

Особенности коррекции СНН с использованием СТЗ

Не излучающие во внешнюю среду (неэманативные) СТЗ представлены фото- или видеокамерой и программным обеспечением, позволяющим идентифицировать полотно дороги и вычислять боковое отклонение d [2,6,10]. На i-м шаге работы СНН рассогласование между ЦКД и СНН, вызванное наличием погрешностей, может быть определено математически как расстояние r_i от данной точки до отрезка ЦКД (*рисунок 1*).

Однако наличие азимутальных девиаций, вызванных нестабильностью объекта относительно осевой линии дороги в процессе реального движения, приводит к тому, что реальное положение объекта отличается от прогнозируемого на величину бокового отклонения d_i, которое и измеряется СТЗ. В этом случае уравнение связи для параметров НС, ЦКД и СТЗ имеет вид:

$$r_i - d_i = H_{CT3} \cdot Z_i \cdot \qquad (9)$$

где H_{CT3} – матрица наблюдения;
Z_i – вектор состояния интегрированной НС на i-м шаге.

Для простоты предположим, что подвижный объект движется строго по оси Y и с учетом этого раскроем составляющие Z_i. Расстояние r характеризуется погрешностью координаты x_K. Данная погрешность зависит от скорости движения объекта V и ошибки ДУ $\Delta\alpha_{CH}$, которая характеризуется СКО начального ДУ α_{CH0} и дрейфом курсового гироскопа ω_Γ, что позволяет представить математическую модель НС в виде системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \Delta x = V \cdot \Delta\alpha_{CH} \\ \Delta\dot{\alpha}_{CH} = \omega_\Gamma \\ \dot{\omega}_\Gamma = \dfrac{-1}{\tau_\Gamma} \cdot \omega_\Gamma + \sigma_{\omega_\Gamma} \cdot \sqrt{\dfrac{2}{\tau_\Gamma}} \cdot \dfrac{W_\Gamma}{\sqrt{dt}} \end{cases} . \qquad (10)$$

В качестве математической модели погрешности ЦКД в данном случае используется КФ вида:

$$k_{x_K}(t) = \frac{2}{3} \cdot \sigma_K^2 \cdot e^{\left(\frac{-5 \cdot V \cdot t}{2 \cdot L_K}\right)} \cdot \left(1 + \frac{5 \cdot V \cdot t}{2 \cdot L_K}\right), \qquad (11)$$

где – СКО погрешности координаты x_K, с соответствующей системой дифференциальных уравнений:

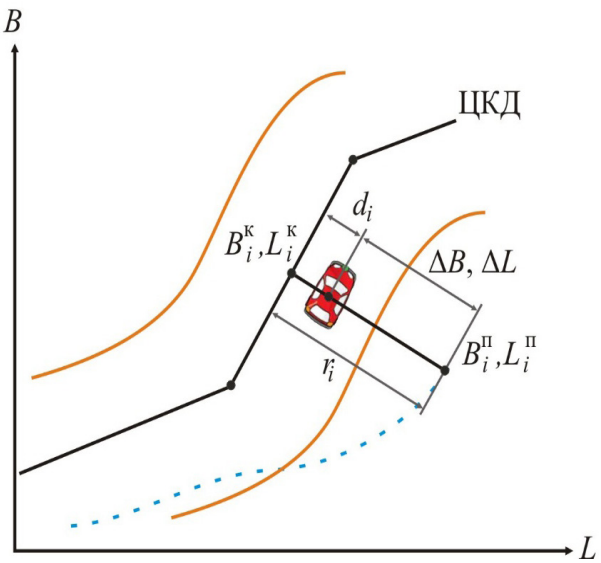


Рис. 1. К задаче оценивания угла азимутальной ориентации по информации ЦКД и СТЗ

$$\begin{cases} \Delta\dot{x}_K = v_K \\ \dot{v}_K = -\left(\dfrac{5 \cdot V}{2 \cdot L_K}\right)^2 \cdot \Delta x_K + \left(-\dfrac{5 \cdot V}{L_K}\right) \cdot v_K + \sigma_K \cdot \dfrac{5 \cdot V}{L_K^2} \cdot \sqrt{\dfrac{5 \cdot V}{3 \cdot L_K}} \cdot \dfrac{W_{xK}}{\sqrt{dt}} \end{cases}, \qquad (12)$$

где $W_{xK}(t)$ – «белый» шум единичной интенсивности;
$v_K, \sigma_{v_K} = \sigma_K \cdot \dfrac{5 \cdot V}{\sqrt{6} \cdot L_K}$ – производная бокового отклонения объекта и его СКО.

Модель погрешности измерения бокового отклонения может быть представлена дифференциальным уравнением

$$\Delta\dot{d} = \frac{-V}{\tau_d} \cdot \Delta d + \sigma_d \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot V}{\tau_d}} \cdot \frac{W_d}{\sqrt{dt}}, \qquad (13)$$

где σ_d – СКО бокового отклонения;
τ_d – период корреляции погрешности бокового отклонения;
$W_d(t)$ – «белый» шум единичной интенсивности.

Искомая оценка ДУ интегрированной НС и его СКО находятся по известным соотношениям фильтра Калмана.

Численная оценка точности определения азимута

Оценка потенциально-достижимой точности определения азимута проводилась на основе имитационного моделирования интегрированной СНН, детально раскрытой выше. Основные результаты представлены графиком зависимости СКО ДУ от пройденного пути S (*рисунок 2*). Моделирование проводилось со следующими основными исходными данными (в скобках представлены параметры, при которых получен график):

- скорость движения по маршруту 5…20 м/с (10 м/с);
- СКО собственных девиаций объекта 30…180“ (30“) [4];
- СКО начального ДУ 30…300 угловых секунд (60 угл. секунд);
- СКО дрейфа курсового гироскопа 0,01…0,08 градус/час (0,035 градус/час);
- СКО датчика дирекционного угла 10…60» (10») [2,4];
- СКО координат концов отрезка ЦКД 0,1…10 м (0,1 м);
- средняя протяженность отрезков ЦКД 100…1000 м (170 м) [4];
- СКО измерения боковых отклонений посредством СТЗ 0,01…1 м (0,05 м) [2,6,10].

Выводы:

- наиболее существенное влияние на СКО ДУ оказывает СКО координат концов отрезков ЦКД и средняя протяжённость этих отрезков;
- значительное влияние на СКО ДУ оказывают пройденный путь объекта (не менее 2 км), дрейф курсового гироскопа и СКО измерения

СТЗ бокового отклонения объекта относительно осевой линии дороги;

- существует принципиальная возможность достижения СКО на уровне нескольких угловых секунд при коррекции СНН по информации ЦКД и СТЗ.

Литература

1. Дмитриев С.П. Оптимальное решение задачи автомобильной навигации с использованием карты дорог / Дмитриев С.П., Степанов О.А., Ривкин Б.С., Кошаев Д.А., Чанг Д. // Гироскопия и навигация, 2000. №2(29). С.57-69.
2. Лычагов А.С. Опыт создания и применения систем технического зрения для навигации наземных подвижных объектов / К.А. Асатрян, А.Г. Букин, А.С. Лычагов, Р.Н. Садеков // 7-я Всероссийская мультиконференция по проблемам управления: материалы XXIX конференции памяти Н.Н. Острякова, Санкт-Петербург, Россия, 7-9 октября 2014. С. 226-231.
3. Степанов О.А. Состояние, перспективы развития и применения наземных систем навигации для подвижных объектов // Гироскопия и навигация, 2005. №2(49). С.95-120.
4. Шолохов А.В., Садеков Р.Н. Обоснование допусков в задачах комплексной обработки информации автомобильных навигационных систем и цифровых карт дорог // Известия Института инженерной физики, 2014. №2(32). С. 61-65.
5. Шолохов А.В. Основы теории оценивания навигационной информации: Учебное пособие. М.: ВА РВСН имени Петра Великого (филиал в г. Серпухове Московской области), 2016. 120с.
6. Шолохов А.В. Система технического зрения как источник дополнительной информации в задаче автомобильной навигации / А.В. Шолохов и др. // Гироскопия и навигация, 2017. №1(96). С. 49-63.
7. Навигационный рынок [Электронный ресурс] / ГЛОНАСС – НП ГЛОНАСС – Некоммерческое партнерство «Содействие развитию и использованию навигационных технологий». Режим доступа https://glonassunion.ru/navigation-market.html. Дата обращения 14.12.2021.
8. Степанов О.А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч 2. Введение в теорию фильтрации. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2012. 417 с.
9. Степанов О.А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч 1. Введение в теорию оценивания. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2010. 509 с.
10. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2012. 1104 с.

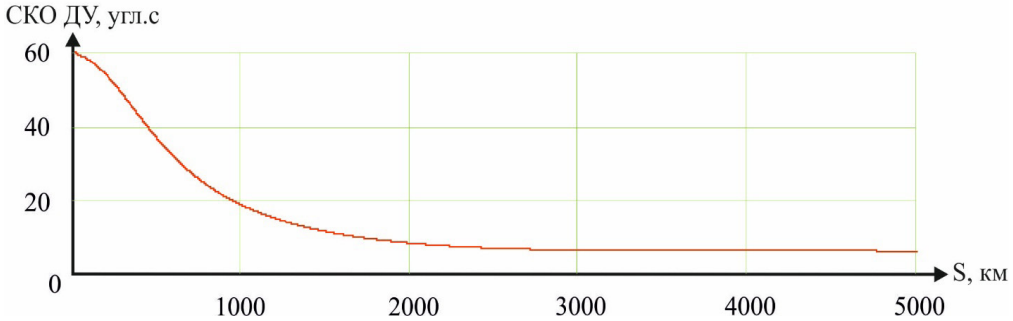
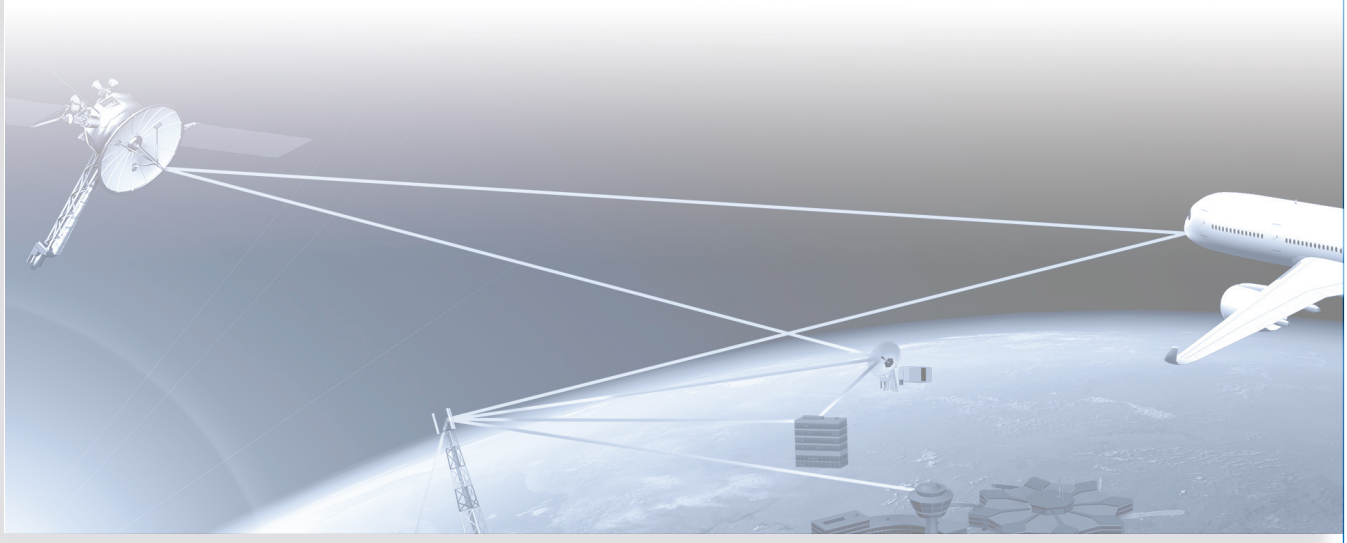


Рис. 2. График зависимости СКО ДУ от пройденного пути при коррекции СНН по ЦКД и СТЗ



УДК 004.93+621.37

ОБНАРУЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ЗАКЛАДОК, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ РАДИОКАНАЛ ДЛЯ ПРИЕМА И ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

DETECTION OF ELECTRONIC BOOKMARKS USING A RADIO CHANNEL FOR RECEIVING AND TRANSMITTING INFORMATION

Игорь Александрович Бугаков
заслуженный изобретатель РФ
почетный работник науки и техники РФ
доктор технических наук, профессор
член Научного совета при Президиуме РАН
по методологии искусственного интеллекта
и когнитивных исследований
вице-президент по инновационным проектам
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210 Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967) 35-31-93
E-mail: bia@iifmail.ru

Алексей Игоревич Бугаков
старший специалист
МОУ «ИИФ».

Александр Сергеевич Филиппов
аспирант
МОУ «ИИФ».

Сергей Викторович Алексеев
аспирант
МОУ «ИИФ».

Михаил Михайлович Шульга
аспирант
МОУ «ИИФ».

Аннотация

В статье рассматриваются способы обнаружения электронных закладок, внедренных в технические средства приема, обработки, хранения и передачи информации (ТСПИ), включая стадии изготовления и приемки радиоэлектронных комплектующих, сборки из них отдельных модулей и ТСПИ в целом и их приемку, эксплуатации ТСПИ. Обнаружение основано на сравнении электромагнитных сигналов, излучаемых радиоэлектронным комплектующим узлом (модулем, ТСПИ в целом) при подключении к источнику питания, с эталонными электромагнитными сигналами, которые излучает комплектующий узел (модуль, ТСПИ в целом), в котором заведомо нет электронных закладок.

Ключевые слова: электронная закладка, радиоканал, комплектующее, сборка, электромагнитный сигнал, эталонный образ, спектр, приемосдаточные испытания, обнаружение, сравнение, распознавание, нейронная сеть.

Summary

The article discusses the methods of detecting electronic bookmarks embedded in the technical means of receiving, processing, storing and transmitting information (TMRI), including the stages of manufacturing and acceptance of radio-electronic components, assembly of individual modules and TMRI as a whole from them and their acceptance, operation of TMRI. Detection is based on a comparison of electromagnetic signals emitted by a radio-electronic component unit (module, TMRI as a whole) when connected to a power source with reference electromagnetic signals emitted by a component unit (module, TMRI as a whole), in which there are obviously no electronic bookmarks.

Keywords: electronic bookmark, radio channel, component, assembly, electromagnetic signal, reference image, spectrum, acceptance tests, detection, comparison, recognition, neural network.

В настоящее время все более актуальной является проблема обнаружения в изделиях электронной техники электронных закладок (автоматических электронных устройств негласного получения информации, электронных устройств вывода (в том числе дистанционного) изделия электронной техники из строя, электронных устройств несанкционированного удаления и (или) изменения обрабатываемой изделием электронной техники информации, электронных устройств ограничивающих доступ к обрабатываемой информации и др.).

Основным каналом несанкционированного доступа к обрабатываемой (циркулирующей, хранимой) в изделии электронной техники информации является радиоканал, через кото-

рый внедренная электронная закладка передает конфиденциальную информацию, выдает и (или) принимает внешние команды управления. Радиоэлектронный канал утечки информации обладает следующими особенностями, делающими его наиболее предпочтительным для нарушителей [1]:

- независимость функционирования канала от времени суток и года, существенно меньшая зависимость его параметров по сравнению с другими каналами от метеоусловий;
- высокая достоверность добываемой информации (за исключением случаев дезинформации);
- большой объем добываемой информации;
- оперативность получения информации вплоть до реального масштаба времени.

Для скрытия радиоэлектронного канала утечки информации (или их комбинации) могут быть использованы следующие методы [2]:

- с накоплением информации за определенный период времени и её последующей передачей в назначенное время или при получении внешней команды;
- с использованием широкополосных сигналов с энергией сигнала, распределенной в широкой полосе частот, без ярко выраженного превышения над шумами;
- с применением шумоподобных сигналов со специальными алгоритмами кодирования;
- с использованием специальных узкополосных сигналов внутри спектра легальных широкополосных сигналов;
- с выбором частоты излучения вблизи частот источников мощных легальных сигналов;
- с использованием стандартных каналов связи (GSM,CDMA, WiFi, BlueTooth и др.).

Для обнаружения электронных закладок, использующих радиоэлектронный канал утечки информации, в настоящее время проводят радиоконтроль (как правило, круглосуточный) с поиском источников радиоизлучений, мощность которых превышает мощность электромагнитного фона, а также поиском и селекцией радиосигналов по частоте с последующей идентификацией их текущей признаковой структуры с эталонной признаковой структурой закладного устройства [3,4]. Очевидно, что во время работы изделия электронной техники целесообразно регистрировать все излучаемые сигналы в помещении, где находится изделие электронной техники, выявляя и идентифицируя их принадлежность или работающему изделию, или закладке известного типа, или неизвестному устройству, которое, вероятнее всего, является электронной закладкой.

Однако такой радиоконтроль, проводимый на этапе эксплуатации изделия электронной техники, может быть эффективным только при полной уверенности в изначальном отсутствии в изделии электронной техники электронных закладок. Только тогда сигнал работающего изделия можно регистрировать как эталонный и использовать в дальнейшем.

Но такая уверенность может появиться лишь в том случае, если контролируется весь процесс изготовления и поставки изделия электронной техники (с отдельным контролем электронных комплектующих, из которых собрано изделие). Ведь электронная закладка может быть заложена в поставляемые изделия еще на этапе их изготовления или сборки из комплектующих, так что то, что будет считаться эталонным сигналом работающего изделия (сейчас такой сигнал обычно формируется перед началом применения изделия в эксплуатирующей изделие организации), на самом деле может являться общим сигналом работающего изделия и закладки.

Исходя из вышеизложенного, становится очевидной целесообразность выявления электронных закладок, внедренных на этапах производства радиоэлектронных комплектующих и сборки из них изделий электронной техники, на этапе приемо-сдаточных испытаний, т.е. до начала эксплуатации изделий электронной техники. Однако сегодня процесс приемо-сдаточных испытаний изделий электронной техники включает в себя только проверку основных параметров и характеристик, определяющих функциональное назначение изделия электронной техники [5], и не включает в себя операции, позволяющие сделать обоснованный вывод об отсутствии электронных закладок. Это делает рискованным применение таких изделий электронной техники при решении ответственных (в частности, оборонных) задач.

Идея включения в процесс приемки изделий электронной техники на этапе приемо-сдаточных испытаний операций по обнаружению в принимаемом изделии электронной техники, излучающем электромагнитные сигналы при подключении к источнику питания, не предусмотренных технологией его изготовления для выполнения своего функционального назначения электронных закладок, наличие которых влияет на излучаемые изделием электронной техники электромагнитные сигналы, изложена в [6]. Такой подход позволяет гарантировать отсутствие в изделии электронной техники закладки, получить действительно эталонный сигнал изделия, периодическое сравнение с которым в процессе эксплуатации изделия позволя-

ет уверенно определить наличие встроенных на этапе эксплуатации закладок. Кроме того, полученный временной тренд изменения эталонных сигналов изделия может быть использован для оценки состояния его работоспособности и прогнозирования оставшегося ресурса.

Обнаружение электронных закладок на этапе приемо-сдаточных испытаний осуществляется посредством сравнения электромагнитных сигналов, излучаемых принимаемым изделием электронной техники, подключенным к источнику питания, с эталонными электромагнитными сигналами изделия электронной техники, в котором заведомо нет закладок, для чего выполняются следующие действия:

- на принимаемое изделие электронной техники подают питание, обеспечивающее выход изделия электронной техники на рабочий режим;
- регистрируют излучаемые изделием электронной техники электромагнитные сигналы;
- на основе зарегистрированных электромагнитных сигналов формируют электромагнитный образ (например, выделяют спектральные составляющие зарегистрированных электромагнитных сигналов) изделия электронной техники;
- сравнивают сформированный электромагнитный образ с эталонным электромагнитным образом изделия электронной техники, представленном в том же, что и эталонный электромагнитный образ изделия электронной техники, виде (например, в виде спектральных составляющих), в котором заведомо нет закладок;
- в случае совпадения с требуемой точностью сформированного и эталонного электромагнитных образов в сопроводительную документацию к изделию электронной техники вносят запись об отсутствии закладок, влияющих на излучаемое изделием электронной техники электромагнитные сигналы, и о возможности использования данного изделия электронной техники для выполнения его функционального назначения, а в случае несовпадения – изделие бракуется, как не прошедшее приемку;
- записывают электромагнитный образ принятого изделия электронной техники на электронный носитель, прилагаемый к сопроводительной документации к изделию электронной техники.

Эталонный электромагнитный образ изделия электронной техники, в котором заведомо нет закладок, формируется посредством регистрации и статистической обработки электромагнитных сигналов эталонной партии изделий электронной техники, например, сторонней специализированной организацией, имеющей право выносить решение о наличии или отсутствии закладки. С этим эталонным электромагнитным образом осуществляется сравнение электромагнитного образа каждого принимаемого изделия электронной техники, изготовленного из тех же материалов и по той же технологии, что и эталонная партия. Эта же сторонняя организация может осуществлять дополнительные исследования бракованных изделий электронной техники, в процессе которых выявляют причины несовпадения электромагнитных образов (наличие влияющих на электромагнитный сигнал закладок, использование не прошедших сертификацию материалов, нарушение технологического процесса изготовления и др.).

Аналогичным образом может проходить приемка сложного изделия электронной техники (технического средства приема, обработки, хранения и передачи информации – ТСПИ), к которым можно подвести питание и вывести на рабочий режим, состоящего из прошедших приемку изделий электронной техники (электронных комплектующих). Необходимость проверки сложных изделий электронной техники вызвана возможностью присутствия в каждом из принятых комплектующих, из которых состоит сложное изделие электронной техники, лишь части закладки, которая может быть выявлена только при анализе работы всего сложного изделия электронной техники. Электромагнитный образ сложного изделия электронной техники, как и отдельного изделия, прилагается к сопроводительной документации.

Способ обнаружения скрытых каналов утечки информации в ТСПИ, в котором в качестве электромагнитного образа сигнала используются его спектральные составляющие, затрагивающий этапы подготовки радиоэлектронных комплектующих к сборке ТСПИ, сборки из этих комплектующих ТСПИ и эксплуатации ТСПИ описан в [7].

Проверка каждого комплектующего состоит в следующем:

- на комплектующее подают питание, обеспечивающее выход комплектующего на рабочий режим;
- регистрируют излучаемые комплектующим электромагнитные сигналы и выделяют их спектральные составляющие;
- сравнивают спектральные составляющие зарегистрированных электромагнитных сигналов со спектральными составляющими эталонных электромагнитных сигналов, которые должно излучать комплектующее, в котором заведомо нет закладок;
- делают вывод об отсутствии закладок и о возможности использования данного комплектующего для сборки ТСПИ.

Спектральные составляющие эталонных электромагнитных сигналов для каждого типа комплектующих, в которых заведомо нет закладок, формируются на заводе-изготовителе посредством регистрации и статистической обработки электромагнитных излучений эталонной партии комплектующих под контролем сторонней специализированной организации, имеющей право выносить решение о наличии или отсутствии закладки. По результатам контроля к документации поставляемых комплектующих прилагаются спектральные составляющие эталонных электромагнитных сигналов на электронном носителе и соответствующий сертификат.

На этапе сборки ТСПИ проводится проверка функциональных узлов ТСПИ, собранных из нескольких проверяемых радиоэлектронных комплектующих (в том числе поступающих от разных заводов-изготовителей), а также сборок из нескольких функциональных узлов ТСПИ, к которым можно подвести питание и вывести их на рабочий режим. Необходимость проверки функциональных узлов (их сборок) ТСПИ объясняется возможностью присутствия в отдельном комплектующем лишь части закладки, которая может быть выявлена только при анализе работы функциональных узлов (их сборок). Такая проверка осуществляется на заводе-сборщике (заводе, осуществляющем сборку ТСПИ) также под контролем вышеупомянутой специализированной организации, в процессе которого формируются спектральные составляющие эталонных электромагнитных сигналов каждого функционального узла (их сборок) ТСПИ. Факт отсутствия закладок в функциональных узлах (их сборках) оформляется соответствующим сертификатом с приложением, как и в случае отдельных комплектующих, спектральных составляющих эталонных электромагнитных сигналов каждого функционального узла (их сборки из функциональных узлов) на электронном носителе.

После сборки ТСПИ из успешно прошедших проверку радиоэлектронных комплектующих и функциональных узлов (их сборок) на заводе-сборщике проводится регистрация эталонных электромагнитных сигналов ТСПИ на всех режимах работы в различных точках пространства вокруг собранного ТСПИ с последующим выделением спектральных составляющих, амплитуды которых превышают априорно заданные пороговые значения. Полученные эталонные спектральные составляющие заносятся в электронную базу данных данного ТСПИ и используется в дальнейшем для выявления закладок на этапе эксплуатации.

На этапе эксплуатации ТСПИ могут появиться закладки, использующие скрытые каналы утечки информации, вследствие действий злоумышленника (например, внедрение вредоносного программного обеспечения, скрытная установка закладки в эксплуатируемый ТСПИ, внедрение закладки в линии питания эксплуатируемого ТСПИ, скрытное размещение устройства вокруг ТСПИ для регистрации излучаемых ТСПИ электромагнитных сигналов и др.). Для их обнаружения осуществляется радиомониторинг: постоянный (что предпочтительней) или периодический. В процессе радиомониторинга выявляют отклонения амплитуд спектральных составляющих регистрируемых электромагнитных сигналов работающего ТСПИ от его эталонных значений, величина которых свидетельствует о присутствии или отсутствии закладки. Очевидно, что несанкционированные излучения в месте установки неработающего ТСПИ, также свидетельствуют о наличии закладки.

Для идентификации закладки предварительно формируют эталонную базу данных о спектральных составляющих радиоизлучений известных закладок, а также эталонную базу данных о спектральных составляющих ТСПИ одновременно работающего с внедренными закладками различных типов. Эти эталонные базы могут формировать сторонние специализированные организации, предоставляя их для использования организациям, эксплуатирующим ТСПИ. После выявления отклонений осуществляют сравнение полученных спектральных составляющих с эталонными спектральными составляющими (в случае неработающего ТСПИ – со спектральными составляющими известных закладок, в случае работающего ТСПИ – со спектральными составляющими ТСПИ одновременно работающего с внедренными закладками различных типов). При этом учитывается расписание работы ТСПИ. Тем самым осуществляется выявление факта наличия закладки и идентификация её типа в случае как работающего, так и не работающего ТСПИ.

Сравнение зарегистрированных спектральных составляющих электромагнитных сигналов с эталонными спектральными составляющими может осуществляться посредством применения распознающих возможностей современных искусственных нейронных сетей глубокого обучения.

Учитывая возможное изменение электромагнитных сигналов ТСПИ в процессе эксплуатации (например, вследствие старения радиоэлектронных элементов) эталонные спектральные составляющие электромагнитных сигналов эксплуатируемого ТСПИ, в котором нет закладок,

периодически обновляются (периодичность обновления зависит от состава ТСПИ и для каждого типа ТСПИ определяется экспериментально). Периодическое обновление эталонных спектральных составляющих электромагнитных сигналов эксплуатируемого ТСПИ позволяет на основе получаемых данных более точно выявлять наличие закладных устройств. Кроме того, наличие периодически обновляемых эталонных спектральных составляющих электромагнитных сигналов ТСПИ позволяет на основе получаемого временного ряда решать задачу текущего диагностирования технического состоянии ТСПИ (по аналогии, например, с диагностированием специалистом или искусственным интеллектом состояния работающего двигателя автомобиля по его звучанию) и прогнозировать его оставшийся ресурс работы.

Литература

1. Хорев А.А. Способы и средства защиты информации: Учеб. пособие. М.: МО РФ, 2008. 316 с.
2. Хорев А.А. Техническая защита информации / Учеб. пособие для студентов вузов. В 3-х томах. Т.1: Технические каналы утечки информации. М.: НПЦ «Аналитика», 2008. 436 с.
3. Титов А.А. Инженерно-техническая защита информации / Учеб. пособие. Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2010. 197 с.
4. Постановление Правительства Российской Федерации от 1 апреля 2005 г. №175, г. Москва «Об утверждении Правил осуществления радиоконтроля в Российской Федерации».
5. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 53711-2009 «Изделия электронной техники. Правила приемки».
6. Бугаков А.И., Бугаков И.А., Филиппов А.С., Царьков А.Н. Способ приемки изделия электронной техники, излучающего электромагнитные сигналы при подключении к источнику питания. Заявка на выдачу патента РФ на изобретение №2021131193/20/066151 от 25.10.21.
7. Бугаков А.И., Бугаков И.А., Филиппов А.С., Царьков А.Н. Способ обнаружения скрытых каналов утечки информации в технических средствах приема, обработки, хранения и передачи информации. Патент на изобретение №2752281, МПК: G01R 29/08 (2006.01), заявка №2020121744 от 29.06.2020 г.

УДК 629.7

МЕТОД СЕЛЕКЦИИ ОРБИТАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ОБРАБОТКИ НЕОДНОРОДНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

THE METHOD OF SELECTION OF ORBITAL OBJECTS ACCORDING TO THE RESULTS OF PROCESSING INHOMOGENEOUS MEASURING INFORMATION

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

Дмитрий Вячеславович Смирнов
почетный работник науки и техники РФ
доктор технических наук, доцент
действительный член АИН
профессор кафедры
ФГБОУ ВО МАИ (НИУ)
Первый Вице-президент Института –
заместитель Председателя Правления Института
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7 (4967) 35-31-93
E-mail: dv_smr@iifmail.ru

Александр Константинович Ключкин
адъюнкт кафедры
«Бортовых информационных и измерительных
комплексов космических аппаратов»
ВКА имени А.Ф. Можайского
Адрес: Адрес: 197198, Санкт-Петербург,
ул. Ждановская, д. 13
Тел.: 8 (908) 836-62-51
E-mail: anyska1996@mail.ru

Аннотация
В статье рассмотрены основные проблемные вопросы селекции космических объектов в околоземном космическом пространстве. Предложены физические и математические постановки задач по тематике исследований. Предложены подходы к ее решению.
Ключевые слова: околоземное космическое пространство, космический аппарат, методы комплексирования, космические объекты, оптико-электронные средства, целевые объекты.

Summary
The article deals with the main problematic issues of the selection of space objects in near-earth space. Physical and mathematical formulations of problems on the topic of research are proposed. Approaches to its solution are proposed.
Key words: near-earth space, spacecraft, integration methods, space objects, optical-electric devices, target objects.

Введение

Осознание различными государствами своих национальных интересов в космосе привело к тому, что они вступили в борьбу за пересмотр сфер влияния в околоземном космическом пространстве (ОКП), от исхода которой во многом будет зависеть соотношение сил на международной арене. Этот объективный процесс предполагает столкновение национальных интересов различных государств, как это уже было при освоении воздушной среды, морей и океанов.

Под воздействием мирных инициатив России в современной международной обстановке наметился ряд позитивных тенденций, связанных с уменьшением уровня военной угрозы [1], расширением международного сотрудничества и политических мер в ходе урегулирования межгосударственных конфликтов, упрочением мер доверия в сочетании с контролем за военной деятельностью.

В соответствии с государственной программой вооружений в РФ планируется создание и развертывание отечественных космических систем качественно нового поколения [2].

Сущностью процесса сбора и обработки информации о космической обстановке является оперативное и достоверное вскрытие признаков подготовки противника к нападению в космосе и формирование сигнала о космическом нападении (предупреждения о космическом нападении).

В связи с этим при рассмотрении вопросов обеспечения требуемого уровня качества решения задач селекции орбитальных объектов с использованием разнородных космических сил и средств, особую актуальность приобретает исследование возможностей этих средств по определению параметров движения космических объектов (КО).

Физическая постановка задачи

Дано:

1) Космический аппарат наблюдения (КАН), использующий в качестве целевой аппаратуры – оптико-электронные средства (ОЭС) с аппаратно – программным комплексом системы селекции;

2) Множество КО, обнаруженных КАН ОЭС и их селективные признаки, а именно:

2.1) Координатные признаки: сведения о дальности и угловом положении КО. Координатная информация необходима для решения задач обнаружения объекта и определения параметров его движения [3,4]. К некоординатной информации относятся сведения о форме, размерах, изображении, параметрах стабилизации, которые необходимы для решения задач распознавания;

2.2) Некоординатные признаки: спектральные характеристики, энергетические характеристики, блеск.

3) Фоноцелевая обстановка;

4) Каталог КО и параметры целевых объектов (ЦО) – характерные признаки ЦО – заданы;

5) Задача выполняется в автономном режиме;

6) Область наблюдения;

Определить:

1) ЦО из множества космических объектов, обнаруженных ОЭС КАН путем селекции;

2) Требования к системе селекции по качеству измерений селективных признаков;

3) Требования к измерительным средствам системы селекции;

4) Метрику;

5) Законы распределения (нормальные или не нормальные);

Ограничения:

1) Объемы измерений однотипных признаков для всех наблюдаемых объектов – одинаковые;

2) Время принятия решения о целевом – ограничено (мгновенно);

3) Положение исследуемых КО в КП;

4) Огромные скорости движения исследуемых КО;

5) Изменение наблюдаемых областей КП;

6) Количество поступившей информации – ограничено;

7) Совместное использование однотипных признаков – затруднено;

8) Совместное использование возможной другой поступающей информации – затруднено (например, с Земли);

9) Каналы передачи информации – закрыты;

10) Воздействие помехами со стороны противника;

11) Процессы (детерминированные или случайны – СЛУЧАЙНЫ).

Математическая постановка задачи

Дано:

1) В поле зрения наблюдателя попадает R объектов.

2) n независимые, случайные и, в общем случае, разнородные селективные признаки $X_i, i=\overline{1,n}$, имеющие нормальный закон распределения, характеризующие R объектов;

3) Эталонные значения $x_{эi}, i=\overline{1,n}$, селективных признаков для ЦО

4) Измерительная информация о селективных признаках для всех наблюдаемых КО

$$\Omega_r=\left\{x_{ij}^{(r)},\ i=\overline{1,n},\ j=\overline{1,N_i}\right\},\ r=\overline{1,R},$$

где $x_{ij}^{(r)}$ – значение i-го селективного признака, полученное при его j-м измерении для r-го объекта;

$N_i \geq 1$ – число измерений i-го признака [4]. Измерения являются независимыми, причем один и тот же селективный признак для всех объектов измеряется одинаковое число раз, а объемы измерений разных признаков $N_1, N_2,\ldots,N_n$ могут отличаться.

5) Погрешности измерений селективных признаков характеризуются известными дисперсиями $D_{X_i}, i=\overline{1,n}$.

Определить:

1) Необходимо из множества наблюдаемых R объектов выбрать ЦО, интересующий наблюдателя.

Решение задачи:

Для решения задачи выбора целевого объекта из множества объектов, попавших в поле зрения наблюдателя, необходимо:

1. По формуле

$$a_i=\frac{c_i/D_{X_i}}{\sum\limits_{i=1}^{n}N_i c_i^2/D_{X_i}},\ i=\overline{1,n}.$$

определить коэффициенты $a_i, i=\overline{1,n}$, модели комбинированного признака;

2. По формуле

$$y_э=\sum_{i=1}^{n}a_i N_i x_{эi}=\frac{1}{\sum\limits_{i=1}^{n}N_i c_i^2/D_{X_i}}\sum_{i=1}^{n}\frac{N_i c_i x_{эi}}{D_{X_i}}$$

определить эталонное значение $y_э$ модели ком-

бинированного признака;

3. По результатам измерений

$$\Omega_r = \left\{ x_{ij}^{(r)},\ j = \overline{1, N_i},\ i = \overline{1, n} \right\},\ r = \overline{1, R},$$

селективных признаков рассчитать значения комбинированного признака для каждого из объектов по формуле

$$y_r = \sum_{i=1}^{n} a_i \sum_{j=1}^{N_i} x_{ij}^{(r)},\ r = \overline{1, R}$$

4. По формуле определить соответствующие значения величины Z:

$$z_r = \frac{(y_r - y_э)^2}{D_y},\ r = \overline{1, R}.$$

5. Задать требуемое значение вероятности γ.

6. Из уравнения

$$P(Z \geq z_\gamma) = \int_{z_\gamma}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} z^{-1/2} e^{-z/2} dz = \gamma$$

найти граничное значение z_γ.

7. Проверить условия

$$z_r \leq z_\gamma,\ r = \overline{1, R}$$

и определить множество S номеров объектов, удовлетворяющих этим условиям.

8. Из множества S выбрать номер s объекта, для которого

$$z_s = \min\{z_\nu,\ \nu \in S\}.$$

При этом вероятность того, что будет принято правильное решение, равна $1-\gamma$.

9. Если для всех объектов значения z_r, $r = \overline{1, R}$, больше z_γ, то полагается, что интересующий наблюдателя объект отсутствует в его поле зрения и для принятия решения необходима дополнительная измерительная информация [3]. При отсутствии такой информации предпочтение отдается объекту с наименьшим значением меры.

Основные этапы обработки информации, полученной с ОЭС КА

Задача селекции ОЭС КАН – сложная многоуровневая задача. Все параметры оптической системы находятся в тесной взаимозависимости. Для выполнения задачи исследований будет необходимо выбрать такие параметры ОЭС, которые наиболее точно и оперативно позволят получать информацию о координатных и некоординатных признаках ЦО.

Обработку полученной с ОЭС информации предполагается проводить в пять этапов.

Первый этап – фильтрация сигнала по уровню и скорости, выявление и устранение помех;

Второй этап – определение оценок параметров движения КО по нескольким кадрам (оценки сравниваются с исходными требованиями);

Третий этап – фильтрация естественных источников излучения (звезд, планет) по направлению и скорости перемещения;

Четвертый этап – выделение узконаправленного поля в приборах оптической информации для наблюдения КО;

Пятый этап – наблюдение объекта и выдача целеуказаний в центр контроля космического пространства.

Заключение

В космическом пространстве на земной орбите на сегодняшний день находится огромное количество космических объектов, причем с каждым годом их число растет. На учете в главном каталоге КО находится более четырех тысяч функционирующих КА, а общее количество спутников вместе с уже отработавшими превышает 15 тысяч.

Помимо этого, проблемной становится ситуация с космическим мусором на орбите Земли. История уже знает случаи столкновений функционирующих КА с объектами, уже отработавшими свой ресурс, в результате чего на орбите Земли скачкообразно увеличилось количество объектов.

Все приведенные данные необходимо учитывать при моделировании процесса работы системы.

Литература

1. Баллистика и навигация космических аппаратов: учебник для вузов / Н.М. Иванов, Л.Н. Лысенко. 3-е изд. Перераб. и доп. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2016. 523 с.

2. Меньшиков В.А., Перминов А.Н., Рембеза А.И., Урличич Ю.М. Основы анализа и проектирования космических систем мониторинга и прогнозирования природных и техногенных катастроф. М.: Машиностроение, 2014. 736 с.

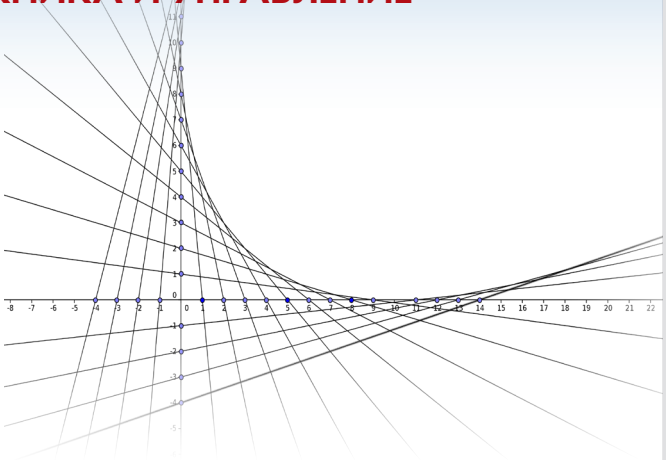
3. Арсеньев В.Н. Определение параметров движения космического аппарата по результатам их измерений бортовыми и наземными и измерительными средствами / В.Н. Арсеньев, Е.Н. Белихин, И.А. Трофимов. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2019. С. 81-88.

4. Арсеньев В.Н. Метод оценивания характеристик точности систем управления перспективных объектов по ограниченному числу испытаний / В.Н. Арсеньев, К.Г. Зиновьев, И.А. Трофимов, А.А. Ядренкин. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2019. С. 182-188.

УДК 004.898

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ВЕКТОРНОЙ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ РАСЧЕТА МАРШРУТОВ НА ГРАФАХ ГЕНЕТИЧЕСКИМ АЛГОРИТМОМ

A METHOD FOR CONSTRUCTING A VECTOR OBJECTIVE FUNCTION FOR CALCULATION OF ROUTES ON GRAPHS BY A GENETIC ALGORITHM



Эдуард Михайлович Руденко
кандидат технических наук
доцент кафедры математики
филиал ВА РВСН им. Петра Великого
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел.: +7 (916) 851-80-55
E-mail: eduard5529@yandex.ru

Елена Викторовна Семикина
преподаватель кафедры информатики
филиал ВА РВСН им. Петра Великого
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
E-mail: labinfo_serp@inbox.ru
Тел.: +7 (915) 064-50-74

Аннотация

В статье рассматривается применение генетического алгоритма для расчета оптимальных замкнутых маршрутов БПЛА на эйлеровом графе реперных точек на местности для обеспечения БПЛА программой полета. Математическая задача нахождения маршрута на графе реперов решается генетическим алгоритмом с помощью минимизации неотрицательной целевой функции от целочисленных переменных меняющихся во множестве номеров вершин графа. Целевая функция строится на основе теорем о единственном представлении математических величин в виде суммы полиномиальных выражений равных целым степеням различных оснований, которые используются для кодирования ребер графа в генетическом алгоритме. Маршрутом являются аргументы целевой функции, которые обращают ее в нуль. Статья рассматривает применения векторного пространства для решения проблемы построения целевых функций графов с большим числом ребер. Это обеспечивает удобное представление информации о ребрах, простоту организации вычислительного процесса минимизации целевой функции генетическим алгоритмом, программную реализацию процесса маршрутизации для управления полетом БПЛА по графу реперных точек.

Ключевые слова: граф реперных точек, оптимальные замкнутые маршруты на графе, целевая функция, векторные коды ребер и генетический алгоритм.

Summary

The article discusses the application of a genetic algorithm for calculating optimal closed UAV routes on the Euler graph of fiducial points on the ground to provide the UAV with a flight program. The mathematical problem of finding a route on a graph of benchmarks is solved by a genetic algorithm by minimizing a non-negative objective function of integer variables that change in the set of graph vertex numbers. The objective function is built on the basis of theorems on the unique representation of mathematical quantities as a sum of polynomial expressions equal to integer degrees of different bases, which are used to encode graph edges in a genetic algorithm. The route is the arguments of the objective function, which make it zero. The article considers the use of vector space for solving the problem of constructing objective functions of graphs with a large number of edges. This provides a convenient representation of information about the edges, the simplicity of organizing the computational process of minimizing the objective function by a genetic algorithm, and the software implementation of the routing process for controlling the UAV flight according to the graph of reference points.

Keywords: fiducial point graph, optimal closed paths on the graph, objective function, edge vector codes and genetic algorithm.

Проблематика построения маршрутов на графах

Для выполнения полетных заданий БПЛА важное значение имеет расчет маршрута перед или в ходе полета на графе реперных точек, обозначенных на местности. Расчет может осуществляться с помощью генетического алгоритма (ГА). Для выполнения этой задачи важное значение имеет построение неотрицательной целевой функции, нулями которой являются маршруты из номеров реперов, как вершин графа, следование по которым обозначает выполнение БПЛА полетного задания [1].

В ряде статей приведены различные способы построения целевых функций (ЦФ), которые основаны на математических теоремах об одно-

значном разложении величин различной природы, таких как, например, целых чисел в произведение степеней простых чисел или в сумму s-ического разложения, многочленных или рациональных функций в произведение неприводимых многочленов или сумму элементарных дробей и т.д. Такой способ построения целевой функции обеспечивает ее обнуление только на наборах, которые являются маршрутами. Хотя существует достаточно много способов кодирования ребер, но наиболее простым является кодирование с помощью теоремы об однозначном представлении чисел в виде суммы полиномов от s^n [2,3].

Многочисленные вычислительные эксперименты с такими целевыми функциями показывают высокую степень сходимости ГА к маршрутам для графов малой размерности, т.е. с небольшим числом ребер и вершин. Но для графов с числом ребер, составляющим десятки и сотни, эффективность перечисленных ЦФ падает, так как приводит к увеличению числа наборов из номеров вершин в поколениях и числа поколений, а, следовательно, и к большим затратам времени счета для получения маршрутов.

Для повышения эффективности работы ГА необходимо разработать целевые функции для графов с большим числом ребер и вершин, которые сочетали бы в себе простоту математической формы и наилучшим образом подходили для оптимизации с помощью целенаправленного преобразования наборов номеров вершин в маршрут операторами кроссовера и мутации, которыми оперирует ГА.

Примеры расчета маршрутов на графах с 28, 36 и 50 ребрами показывают, что коды ребер в виде степеней s^n, которые имеют изменение показателя n от малых значений, равных 0,1,2 и т.д., до высоких значений n=28,36,50 и т.д., затрудняют работу ГА в силу того, что в поколениях в первую очередь отбираются пары вершин (m_i,m_{i+1}), соответствующие кодам s^n с большими значениями показателя n, что приводит в ходе выполнения операции кроссовера к передаче этого признака и, в итоге, к вырождению наборов и потери информации в них о парах (m_i,m_{i+1}) с малыми значениями n, что не дает возможности обнулиться целевой функции. Другими словами, коды ребер с малыми степенями n «теряются» среди кодов с большими n, т.к. генетический алгоритм реализует минимизацию целевой функции.

Кроме того, наличие больших степеней s^n, входящих в виде слагаемых в целевую функцию, при обработке на компьютере приводит к ошибкам машинного округления и к потере точности вычислений.

Следовательно, существует проблема построения ЦФ для больших графов, которая сохраняла бы свойство однозначности представления математических величин в виде суммы или произведения и не приводила к потере точности машинного округления.

Одним из таких способов является построение целевой функции в виде суммы слагаемых, каждое из которых набирается из кодов, находящихся в различных слоях векторного пространства, с размерностью равной числу ребер графа. В этом случае, обнуление слагаемых ЦФ в каждом подпространстве приводит ее к нулевому значению, что эквивалентно построению маршрута на графе. Малое значение размерностей подпространств позволяет избежать понижения чувствительности ГА и потери точности при машинном округлении в ходе выполнения арифметических операций.

Методика построения векторных целевых функций на графах

Рассмотрим граф $v15e28$, состоящий из 15 вершин и 28 ребер (*рисунок 1*).

Граф является эйлеровым, так как все его вершины имеют четную кратность. Для сохранения в построении ЦФ однозначности разложения суммы в качестве кодов ребер графа используется s-ические одночлены s^n с разными основаниями s и степенями n, помещенные в базисные вектора a_i в качестве координат [4]. Размерность векторов равна числу ребер графа $v15e28$, то есть 28: $a_i \epsilon E_{28}$. Для предотвращения потери точности при сложении больших степеней s^n в компьютере вектора кодов ребер разбиты на четыре подпространства размерности семь. Первые семь ребер (1;2), (1;4), (1;6), (1;7), (2;3), (2;4) и (2;5) имеют коды 2^7, 2^8, 2^9, 2^{10}, 2^{11}, 2^{12} и 2^{13}, которые помещены соответственно на

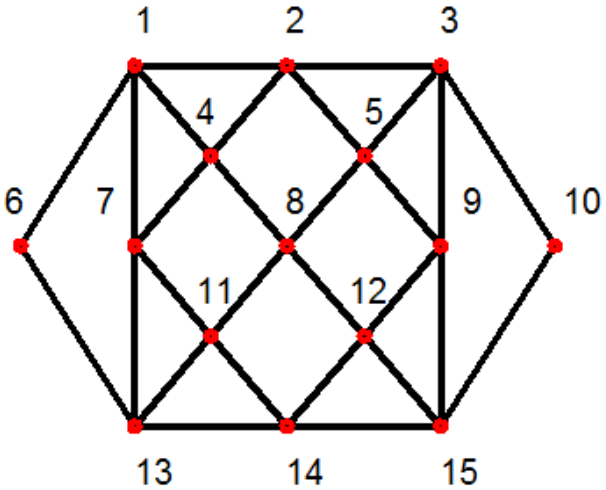


Рис. 1. Эйлеров граф $v15e28$

место первой, второй и т.д. седьмой координаты в 28-мерные векторы. Остальные координаты равны нулю. Векторные коды ребер имеют вид:

$$a_1 = (2^7; 0_2; 0_3; \ldots; 0_{28}),\ a_2 = (0_1; 2^8; 0_3; 0_4; \ldots; 0_{28}),$$
$$a_3 = (0_1; 0_2; 2^9; 0_4; \ldots; 0_{28}),\ \ldots,\ a_7 = (0_1; \ldots; 0_6; 2^{13}; 0_8; \ldots; 0_{28}). \quad (1)$$

Здесь нижний индекс около нулей показывает координату их местоположения в векторе размерности 28. Семь векторов из (1) образуют базис в подпространстве E_1 размерности семь.

Аналогично коды следующих семи ребер (3;5), (3;9), (3;10), (4;7), (4;8), (5;8), (5,9) равны: e^3, e^4, e^5, e^6, e^7, e^8, e^9, где e=2,718281828459045… – трансцендентное число, и которые поставлены на места с восьмой по 14-той координаты в базисные вектора:

$$a_8 = (0_1; \ldots; 0_7; e^3; 0_9; \ldots; 0_{28}),\ a_9 = (0_1; \ldots; 0_8; e^4; 0_{11}; \ldots; 0_{28}),$$
$$a_{10} = (0_1; \ldots 0_8; 0_9; e^5; 0_{11}; \ldots; 0_{28}),\ \ldots,\ a_{14} = (0_1; \ldots; 0_8; \ldots; 0_{13}; e^9; 0_{15}; \ldots; 0_{28}). \quad (2)$$

Векторы из (2) образуют базис в подпространстве E_2.

Следующие семь ребер (6;13), (7;11), (7;13), (8;11), (8;12), (9;12), (9;15) имеют коды 3^2, 3^3, 3^4, 3^5, 3^6, 3^7 и 3^8 и векторные коды:

$$a_{15} = (0_1; \ldots; 0_{14}; 3^2; 0_{16}; \ldots; 0_{28}),\ a_{16} = (0_1; \ldots; 0_{14}; 0_{15}; 3^3; 0_{17}; \ldots; 0_{28}),$$
$$a_{17} = (0_1; \ldots; 0_{15}; 0_{16}; 3^4; 0_{18}; \ldots; 0_{28}),\ \ldots,\ a_{21} = (0_1; \ldots; 0_{20}; 3^8; 0_{22}; \ldots; 0_{28}). \quad (3)$$

Векторы из (3) образуют базис в подпространстве E_3. Последние семь ребер (10;15), (11;13), (11;14), (12;14), (12;15), (13;14), (14;15) имеют коды π^2, π^3, π^4, π^5, π^6, π^7, π^8, где π=3,141592653589793… – трансцендентное число [5]. Векторные коды имеют значения:

$$a_{22} = (0_1; \ldots; 0_{21}; \pi^2; 0_{23}; \ldots; 0_{28}),\ a_{23} = (0_1; \ldots; 0_{21}; 0_{22}; \pi^3; 0_{24}; \ldots; 0_{28}),$$
$$a_{24} = (0_1; \ldots; 0_{21}; 0_{22}; 0_{23}; \pi^4; 0_{25}; \ldots; 0_{28}),\ \ldots,\ a_{28} = (0_1; \ldots; 0_{22}; \ldots; 0_{27}; \pi^8). \quad (4)$$

Векторы из (4) образуют базис в подпространстве E_4.

Таким образом, 28-мерное векторное пространство E распадается в прямую сумму векторных подпространств

$$E = E_1 \oplus E_2 \oplus E_3 \oplus E_4. \quad (5)$$

Представление кодов ребер графа в виде базисных векторов 28-мерного векторного пространства E распараллеливает работу ГА и снижает число слагаемых в каждом подпространстве. Для выравнивания сходимости в каждом подпространстве E_i (i=1,...,4) степени оснований s=2,e,3,π,5 подобраны с разными показателями так, чтобы значения 2^{13}, e^9, 3^7, π^8 были приблизительно одной величины.

Целевая функция $Z(M)$ на наборах $M = M_1 \oplus M_2 \oplus M_3 \oplus M_4$ строится как сумма четырех неотрицательных слагаемых $Z_1(M_1)$, $Z_2(M_2)$, $Z_3(M_3)$ и $Z_4(M_4)$:

$$Z(M) = Z_1(M_1) + Z_2(M_2) + Z_3(M_3) + Z_4(M_4), \quad (6)$$
$$Z_1(M_1) = \mathrm{abs}(\mathrm{sum}(\mathrm{sum1}(1{:}7) - a(1{:}7))),$$
$$Z_2(M_2) = \mathrm{abs}(\mathrm{sum}(\mathrm{sum1}(8{:}14) - a(8{:}14))),$$
$$Z_3(M_3) = \mathrm{abs}(\mathrm{sum}(\mathrm{sum1}(15{:}21) - a(15{:}21))),$$
$$Z_4(M_4) = \mathrm{abs}(\mathrm{sum}(\mathrm{sum1}(22{:}28) - a(22{:}28))),$$

где a – суммарный вектор кодов 28-мерного векторного пространства:

$$a = (2^7; 2^8; 2^9; 2^{10}; 2^{11}; 2^{12}; 2^{13}; e^3; e^4; e^5; e^6; e^7; e^8; e^9; 3^2; 3^3; 3^4; 3^5; 3^6; 3^7; 3^8; \pi^2; \pi^3; \pi^4; \pi^5; \pi^6; \pi^7; \pi^8). \quad (7)$$

Величины a(1:7), a(8:14), a(15:21), a(22:28) равны частным суммам координат вектора (6):

$$a(1{:}7) = 2^7 + 2^8 + 2^9 + 2^{10} + 2^{11} + 2^{12} + 2^{13},$$
$$a(8{:}14) = e^3 + e^4 + e^5 + e^6 + e^7 + e^8 + e^9,$$
$$a(15{:}21) = 3^2 + 3^3 + 3^4 + 3^5 + 3^6 + 3^7 + 3^8, \quad (8)$$
$$a(22{:}28) = \pi^2 + \pi^3 + \pi^4 + \pi^5 + \pi^6 + \pi^7 + \pi^8.$$

Маршрут на графе $v15e28$ с помощью ГА получается при одновременном обнулении четырех слагаемых целевой функции (5). Левые части слагаемых $Z_i(M_i)$ ЦФ (5) на наборах M_i суммируют векторные коды ребер графа в переменной sum1 с помощью цикла (*листинг 1*):

Листинг 1

```
sum1=0;
for i=1:28
sum1=sum1+pasv15e28vector(m(i), m(i+1));
end
```

Цикл из *листинга* перебирает инцидентные между собой ребра, начинаясь и заканчиваясь в вершине с номером один (именно это и формирует маршрут) из набора M: $(m_i, m_{i+1}) = (m(i), m(i+1))$, и с помощью пользовательской подпрограммы pasv15e28vector (разработанной авторами) ставит им в соответствие векторные коды. При появлении в наборе M пар (m_i, m_{i+1}), которые не являются ребрами на графе (ложные ребра), но могут быть сгенерированы ГА, функция pasv15e28vector всем таким ребрам ставит в соответствие один и тот же векторный код-штраф straf значительно больший, чем степени 2^{13}, e^9, 3^8, π^8:

$$straf >> max(2^{13}, e^9, 3^8, \pi^8) \cdot ones(28), \quad (9)$$

где ones(28) – единичный вектор 28 мерного пространства E. Так как код-штраф ложных ребер в ЦФ (5) не компенсируется в правой части, то ГА, реализующий оптимизацию минимизации, от таких пар избавляется в первых поколениях.

Численное моделирование расчета маршрутов на графе $v15e28$ было проведено при различных начальных условиях по числу поколений, наборов-особей и признаках останова, но впервые при настройках: 'Generations', 160, 'PopulationSize', 12000, 'StallGenLimit', 144, 'Vectorized', 'on' и изменении фактора кроссовера от 0,05 до 0,95 с шагом 0,1 (10 различных зна-

чений фактора) [6] ГА показал 100% сходимость к 10 маршрутам (*рисунок 2*), приведенным в *таблице 1*.

На *рисунке 2* показаны пространственные графики перемещения номеров вершин от 1 до 15 графа *v*15*e*28 в 10 маршрутах в зависимости изменения фактора кроссовера от 0,05 до 0,95 с шагом 0,1. Так как значение ЦФ на маршрутах равны нулю, то графики расположены в одной плоскости (fval=*Z*(*M*)=0).

Изменение времени расчета 10 маршрутов приведено на *рисунке 3*.

График на *рисунке 3* линейный и показывает время просчета всех поколений (Generations=160) по всем популяциям (PopulationSize=12000) в каждом поколении с учетом числа повторений одинаковых значений ЦФ (StallGenLimit=144) прежде чем произойдет переход к новому значению фактора кроссовера, согласно настройке работы ГА, меняется равномерно.

Среднее время расчета одного маршрута, как следует из *рисунка 3* составляет 690 секунд. Реальное время сходимости ЦФ к нулю приблизительно в 5 раз меньше, то есть приблизительно 140 секунд. Это показывает *рисунок 4*.

Из *рисунка 4* следует, что ЦФ достигла значения нуль на 26~28 поколении. Остальное время ГА тратит на выполнения условия останова: StallGenLimit = 144. Из формулы следует: *T*=28*690/144≈140 секунд. Численное моделирование проводилось на двуядерном компьютере с частотой процессора 1,76 ГГц. Для более мощных компьютеров расчеты могут составить секунды или доли секунды.

Если рассмотреть граф *v*18*e*36 (*рисунок 5*), то для построения векторной ЦФ векторные коды ребер будут базисными векторами в пространстве *E* размерности 36, которое разобьем в сумму четырех подпространств размерности 9.

Первым девяти ребрам (1;2), (1;5), (1;8), (1;15),

Таблица 1

Результаты расчета ГА маршрутов на графе *v*15*e*28 с помощью ЦФ (5)

Фактор кроссовера	Маршруты на графе
0,5	(1 4 2 5 8 12 14 15 10 3 9 12 15 9 5 3 2 1 6 13 14 11 7 4 8 11 13 7 1)
1,5	(1 4 2 5 9 3 10 15 12 14 15 9 12 8 5 3 2 1 6 13 14 11 13 7 11 8 4 7 1)
2,5	(1 2 3 5 9 12 15 9 3 10 15 14 11 13 14 12 8 5 2 4 1 7 11 8 4 7 13 6 1)
3,5	(1 2 5 3 9 12 15 10 3 2 4 7 11 8 12 14 13 7 1 6 13 11 14 15 9 5 8 4 1)
4,5	(1 6 13 14 15 10 3 9 5 2 1 7 11 8 12 9 15 12 14 11 13 7 4 8 5 3 2 4 1)
5,5	(1 7 11 13 14 11 8 5 2 3 5 9 3 10 15 9 12 14 15 12 8 4 7 13 6 1 2 4 1)
6.5	(1 4 7 11 8 4 2 1 6 13 14 15 9 12 8 5 2 3 9 5 3 10 15 12 14 11 3 7 1)
7,5	(1 7 13 11 7 4 2 3 5 9 12 14 11 8 4 1 6 13 14 15 10 3 9 15 12 8 5 2 1)
8,5	(1 6 13 11 14 12 8 5 3 9 12 15 9 5 2 1 4 8 11 7 13 14 15 10 3 2 4 7 1)
9,5	(1 6 13 14 11 13 7 11 8 4 1 7 4 2 5 9 15 14 12 8 5 3 10 15 12 9 3 2 1)

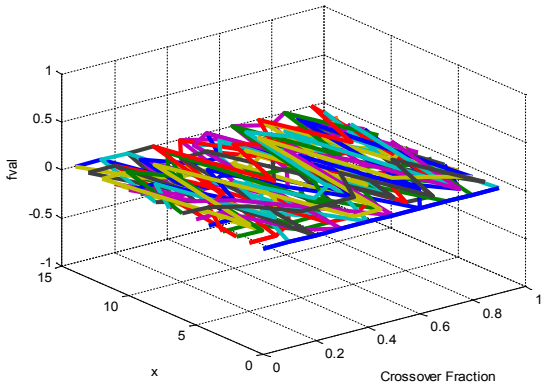


Рис. 2. Графики полной сходимости ЦФ (5) к нулю с помощью ГА при настройках 'Generations', 160, 'PopulationSize', 12000, 'StallGenLimit', 144, 'Vectorized', 'on'

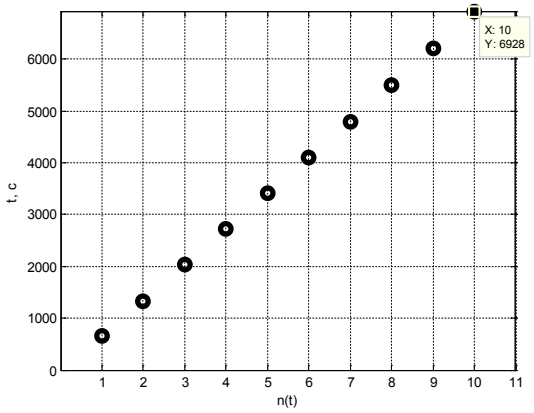


Рис. 3. Точечный график времени подсчета 10 маршрутов на графе *v*15*e*28 в зависимости изменения фактора кроссовера от 0,05 до 0,95 с шагом 0,1

(2;3), (2;5), (2;6), (3;4), (3;6) поставим 2-ические коды: 2^{-1}, 2^3, 2^5, 2^6, 2^7, 2^8, 2^{10}, 2^{11}, 2^{13}, которым соответствуют векторные коды:

$$a_1 = (2^{-1}; 0_2; 0_3; \ldots; 0_{36}),\ a_2 = (0_1; 2^3; 0_3; 0_4; \ldots; 0_{36}),$$
$$a_3 = (0_1; 0_2; 2^5; 0_4; \ldots; 0_{36}),\ \ldots,\ a_9 = (0_1; \ldots; 0_8; 2^{13}; 0_{10}; \ldots; 0_{36}). \quad (10)$$

Следующим девяти ребрам: (3;7), (4;7), (4;11), (4;18), (5;8), (5;9), (6;9), (6;10), (7;10) поставим e-ические коды: e, e^2, e^3, e^4, e^5, e^6, e^7, e^8, e^9, которым соответствуют векторные:

$$a_{10} = (0_1; \ldots; 0_9; e; 0_{11}; \ldots; 0_{36}),\ a_{11} = (0_1; \ldots; 0_{10}; e^2; 0_{12}; \ldots; 0_{36}),$$
$$a_{12} = (0_1; \ldots 0_{11}; e^3; 0_{13}, \ldots; 0_{36}),\ \ldots,\ a_{18} = (0_1; \ldots; 0_{17}; e^9; 0_{19}; \ldots; 0_{36}). \quad (11)$$

Следующим девяти ребрам: (7;11), (8;12), (8;15), (9;12), (9;13), (10;13), (10;14), (11;14), (11;18) поставим 3-ические коды: 3^{-1}, 3, 3^2, 3^3, 3^4, 3^5, 3^6, 3^7, 3^8 которым соответствуют векторные:

$$a_{19} = (0_1; \ldots; 0_{18}; 3^{-1}; 0_{20}; \ldots; 0_{36}),\ a_{20} = (0_1; \ldots; 0_{19}; 3; 0_{21}; \ldots; 0_{36}),$$
$$a_{21} = (0_1; \ldots; 0_{20}; 3^2; 0_{22}; \ldots; 0_{36}),\ \ldots,\ a_{27} = (0_1; \ldots; 0_{26}; 3^8; 0_{29}; \ldots; 0_{36}). \quad (12)$$

Последние девять ребер: (12;5), (12;16), (13;16), (13;17), (14;17), (14;18), (15;16), (16;17), (17;18) имеют коды π^0, π, π^2, π^3, π^4, π^5, π^6, π^7, π^8. Векторные коды имеют значения:

$$a_{28} = (0_1; \ldots; 0_{27}; \pi^0; 0_{29}; \ldots; 0_{36}),\ a_{29} = (0_1; \ldots; 0_{28}; \pi; 0_{30}; \ldots; 0_{36}),$$
$$a_{30} = (0_1; \ldots; 0_{28}; 0_{29}; \pi^4; 0_{31}; \ldots; 0_{36}),\ \ldots,\ a_{36} = (0_1; \ldots; 0_{34}; 0_{35}; \pi^8). \quad (13)$$

Таким образом, 36-мерное векторное пространство E распадается в прямую сумму четырех векторных подпространств

$$E = E_1 \oplus E_2 \oplus E_3 \oplus E_4, \quad (14)$$

что приводит к разложению маршрута на графе $v18e36$ в сумму векторных кодов $M = M_1 \oplus M_2 \oplus M_3 \oplus M_4$ и ЦФ $Z(M)$ на наборах M строится как сумма четырех неотрицательных слагаемых $Z_1(M_1)$, $Z_2(M_2)$, $Z_3(M_3)$ и $Z_4(M_4)$ аналогично выражению (5):

$$Z(M) = Z_1(M_1) + Z_2(M_2) + Z_3(M_3) + Z_4(M_4), \quad (15)$$

$$Z_1(M_1) = \text{abs(sum(sum1(1:9) - } a\text{(1:9)))},$$
$$Z_2(M_2) = \text{abs(sum(sum1(10:18) - } a\text{(10:18)))},$$
$$Z_3(M_3) = \text{abs(sum(sum1(19:27) - } a\text{(19:27)))},$$
$$Z_4(M_4) = \text{abs(sum(sum1(28:36) - } a\text{(28:36)))},$$

где a – суммарный вектор кодов 36-мерного векторного пространства:

$$a = (2^{-1}; 2^3; 2^5; 2^6; 2^7; 2^8; 2^{10}; 2^{11}; 2^{13}; e; e^2; e^3; e^4; e^5; e^6; e^7; e^8, e^9; 3^{-1}; 3; 3^2; 3^3; 3^4; 3^5; 3^6; 3^7; 3^8; \pi^0; \pi; \pi^2; \pi^3; \pi^4; \pi^5; \pi^6; \pi^7; \pi^8). \quad (16)$$

Величины $a(1:9)$, $a(10:18)$, $a(19:27)$, $a(28:36)$ равны частным суммам координат вектора (16):

$$a(1:9) = 2^{-1} + 2^3 + 2^5 + 2^6 + 2^7 + 2^8 + 2^{10} + 2^{11} + 2^{13},$$
$$a(10:18) = e + e^2 + e^3 + e^4 + e^5 + e^6 + e^7 + e^8 + e^9,$$
$$a(19:27) = 3^{-1} + 3 + 3^2 + 3^3 + 3^4 + 3^5 + 3^6 + 3^7 + 3^8, \quad (17)$$
$$a(28:36) = \pi^0 + \pi + \pi^2 + \pi^3 + \pi^4 + \pi^5 + \pi^6 + \pi^7 + \pi^8.$$

Численное моделирование расчета маршрутов на графе при настройках: ‘Generations’, 120, ‘PopulationSize’, 36000, ‘StallGenLimit’, 110, ‘Vectorized’, ‘on’ и изменении фактора кроссовера от 0,5 до 0,95 с шагом 0,05 (10 различных значений фактора) ГА показал 100% сходимость к 10 маршрутам, приведенным в *таблице 2*.

Время расчета каждого маршрута равномерно и приведено на *рисунке 6*.

Следует отметить, что ЦФ (5) и (15) могут быть перепрофилированы под умножение кодов ребер путем замены нулей в векторах на единицы, а сложение векторов на умножение [4]. Построенные таким образом ЦФ становятся мультипликативными, а векторные пространства заменяются на прямые произведения мультипликативных групп. Примерами групп по умножению могут быть группы, порождаемые простыми числами: $G_p = \{p^i | i \in Z\}$ [7].

Выводы:

- векторные целевые функции позволяют распараллелить подсчет значений суммы или

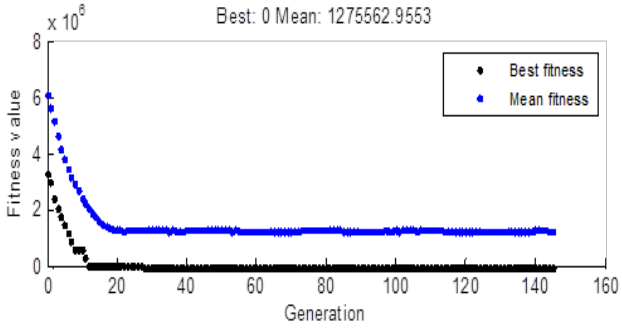


Рис. 4. График расчета одного маршрута на графе $v15e28$ при постоянном факторе кроссовера из интервала от 0,05 до 0,95

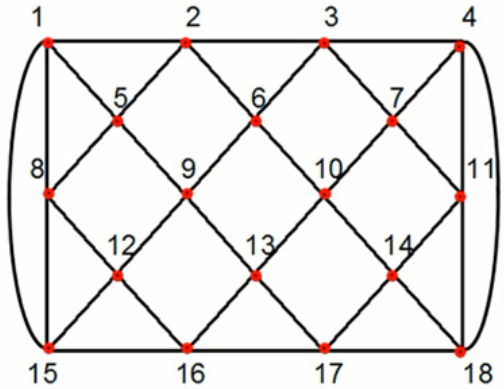


Рис.5. Эйлеров граф $v18e36$

Таблица 2

Результаты расчета ГА маршрутов на графе *v*18*e*36 с помощью ЦФ (15)

Фактор кроссовера	Маршруты на графе
0,5	(1 2 6 3 4 18 11 14 17 18 14 10 7 11 4 7 3 2 5 9 13 17 16 12 9 6 10 13 16 15 12 8 5 1 8 15 1)
0,55	(1 8 15 12 8 5 9 12 16 13 9 6 3 4 7 3 2 5 1 15 16 17 18 4 11 18 14 10 7 11 14 17 13 10 6 2 1)
0,6	(1 2 3 7 11 14 18 4 11 18 17 13 16 17 14 10 13 9 5 1 15 12 16 15 8 12 9 6 10 7 4 3 6 2 5 8 1)
0,65	(1 8 15 16 17 18 4 7 10 14 18 11 14 17 13 16 12 15 1 5 9 12 8 5 2 6 10 13 9 6 3 4 11 7 3 2 1)
0,7	(1 8 12 15 16 13 10 14 17 18 11 14 18 7 11 4 3 7 10 6 3 2 5 1 15 8 5 9 12 16 17 13 9 6 2 1)
0,75	(1 15 16 13 10 7 3 6 10 14 17 18 11 4 18 14 11 4 3 2 6 9 12 8 15 2 16 17 13 9 5 2 1 8 5 1)
0.8	(1 5 2 3 4 11 7 10 13 17 16 15 8 12 15 1 8 5 9 12 16 13 9 6 10 14 11 18 14 17 18 4 7 3 6 2 1)
0,85	(1 15 16 12 15 8 5 2 3 6 10 14 18 4 3 7 11 14 17 18 11 4 7 10 13 17 16 13 9 5 1 2 6 9 12 8 1)
0,9	(1 5 2 1 8 5 9 6 3 7 4 3 2 6 10 7 11 4 18 11 14 10 13 16 12 9 13 17 18 14 17 16 15 8 12 15 1)
0,95	(1 15 16 17 18 11 7 10 14 11 4 18 14 17 13 10 6 2 5 9 6 3 4 7 3 2 1 8 12 9 13 16 12 15 8 5 1)

произведения кодов ребер в частных ЦФ $Z_i(M_i)$ на наборах предполагаемых маршрутов в ГА;

- векторные ЦФ удовлетворяют однозначности разложения суммы кодов ребер, так как векторные коды представляют собой базисные вектора, а числовые коды представляют *s*-ические полиномы по основанию систем счисления из целых чисел 2,3,5 и трансцендентных чисел *e* и π, которые удовлетворяют алгебраической независимости между собой, а по отношению к целым числам являются независимыми переменными [5,7];
- ограничивая число слагаемых или произведений в частных ЦФ $Z_i(M_i)$ удается избежать выхода суммы или умножения чисел за пределы точности машинного округления;

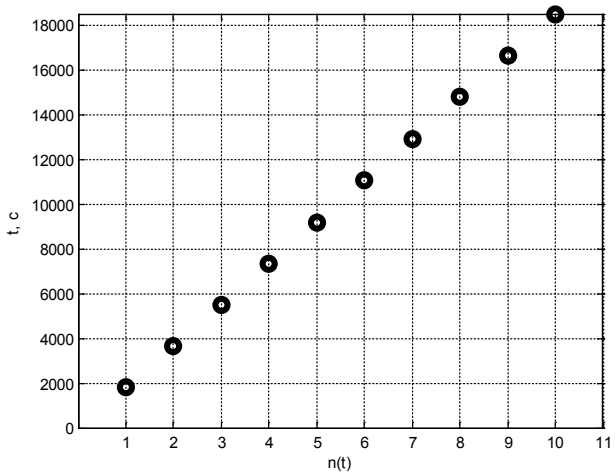


Рис. 6. Временной график подсчета 10 маршрутов на графе *v*18*e*36 в зависимости изменения фактора кроссовера от 0,5 до 0,95 с шагом 0,05

- оценка времени подсчета маршрута ГА с помощью векторных ЦФ показывает приемлемое время для их реализации в бортовых ЭВМ БПЛА.

Литература

1. Гончаренко В.И., Лебедев Г.Н., Михайлин Д.А. Задача оперативной двумерной маршрутизации группового полета беспилотных летательных аппаратов // Известия РАН. Теория и системы управления, 2019. №1. С.153-165.
2. Дараган А.Д. Системы искусственного интеллекта. Монография / А.Д. Дараган, Э.М. Руденко, В.С. Залогин, А.А. Ефремов, А.С. Андреев, М.А. Финогенов, В.В. Чуринов. Серпухов: ФВА РВСН им. Петра Великого, 2020. 205 с.
3. Руденко Э.М., Семикина Е.В. Интеллектуальный мониторинг группы БПЛА на эйлерово-гамильтоновых графах реперов на местности // Известия Института инженерной физики, 2021. №4(62). С.75-80.
4. Руденко Э.М., Семикина Е.В. Маршрутизация беспилотных летательных аппаратов, трансцендентные целевые функции графа и генетический алгоритм // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли, 2021. Т.13. №1. С. 4-14.
5. Гельфонд А.О. Трансцендентные и алгебраические числа. М.: URSS, 2019. 224 с.
6. Гладков Л.А. Генетические алгоритмы / Л.А. Гладков, В.В. Курейчик, В.М. Курейчик; под ред. В.М. Курейчика. 2-е изд., испр и доп. М.: Физматлит, 2006. 320 с.
7. Jacobson N. Basic algebra 1 (2nd ed.), Dover, 2009.

УДК 004.056

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ СААТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ ВИРТУАЛЬНОГО ПОЛИГОНА

APPLICATION OF THE SAATI HIERARCHY ANALYSIS METHOD TO EVALUATE THE EFFECTIVENESS OF THE VIRTUAL TRAINING SPACE INFORMATION PROTECTION SYSTEM

Олег Игоревич Атакищев
доктор технических наук, профессор
заместитель генерального директора
по специальным проектам
МОУ «ИИФ»
E-mail: aoi007@mail.ru

Евгений Валерьевич Умников
ведущий инженер
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел. 8 (4967) 35-31-93
E-mail: rtk@iifmail.ru

Владимир Анатольевич Грачёв
почётный работник
высшего профессионального образования РФ
кандидат педагогических наук
вице-президент Института
МОУ «ИИФ»
E-mail: rtk@iifmail.ru

Аннотация
В данной работе кратко описано возможное применение метода анализа иерархий Т.Саати для оценки эффективности методов защиты информации, приведены основные угрозы информационной безопасности ВП. Рассмотренный метод анализа иерархий позволил оценить альтернативы по каждому из значимых факторов, проранжировать альтернативы и обосновать выбор метода защиты.
Ключевые слова: виртуальное моделирование РТК, многоцелевой виртуальный робототехнический полигон, человеко-машинная система, инцидент, информационная безопасность, метод анализа иерархий Саати.

Summary
This article briefly describes the possible application of T.Saati's hierarchy analysis method to evaluate the effectiveness of information security methods, and presents the main threats to the information security of the VP. The considered method of hierarchy analysis made it possible to evaluate alternatives for each of the significant factors, rank alternatives and justify the choice of a protection method.
Keywords: virtual simulation of robots, virtual training space, simulation systems, information security, saati hierarchy analysis method.

Введение

Необходимость ускорения разработки и тестирования робототехнических комплексов (РТК), невзирая на непрерывное усложнение их подсистем, подталкивает разработчиков к интенсивному использованию разнообразных систем моделирования РТК. Одним из подходов к решению данной задачи, является проведение имитационного моделирования функционирования отдельных или групповых РТК в заданных условиях, на основе программно-аппаратного комплекса «виртуальный полигон» (ВП).

Данный комплекс позволяет проводить ускоренные циклы моделирования разнообразных ситуаций складывающихся во внешнем окружении РТК, имитацию внутренних неполадок в подсистемах РТК или проблем в компонентах связи и управления РТК оператором. По результатам этого моделирования нарабатывается необходимая статистика успешности функционирования, оценивается степень адекватности и уязвимости отдельных элементов информационных систем управления РТК, определяются наиболее существенные условия возникновения рисков неправильного функционирования РТК [1].

Использование ВП, как и любых других автоматизированных информационных систем, диктует определенные условия, связанные с обе-

спечением информационной безопасности процессов, сопровождающих его работу. С точки зрения защиты информации, ВП является сложной распределенной информационно-аналитической системой, насыщенной разнородными информационными каналами связи между серверным кластером ВП, множеством терминалов подключений к ВП и аппаратными блоками систем управления РТК, работу которых необходимо оценить в моделируемой ВП обстановке.

Вся эта сложная и разнородная система, включая каналы связи, сервера ВП, терминалы и тестируемое подключенное оборудование, требует наличие современной комплексной защиты. Данная система должна не только обеспечивать заданный уровень безопасности в соответствии с системой классификации уровней защищенности по ГОСТ, но и иметь программные компоненты оперативного выявления и персечения «ненормального» развития процессов моделирования РТК вследствии возможного неблагоприятного воздействия, на технические и программные средства других участников ВП.

Приказ ФСТЭК, ФСБ и Мининформ связи от 13 февраля 2008 г. №55/86/20 «Об утверждении порядка классификации информационных систем персональных данных» предполагает построение средств защиты информации (СЗИ) информационных систем (ИС) с опорой не на типовые требования, установленные в зависимости от заданного класса защищенности ИС, а в зависимости от угроз, которые могут быть реализованы в результате нарушения безопасности информации.

Необходимость противодействия таким атакам определяет требования к наличию не только систем анализа защищенности, но и систем обнаружения компьютерных атак (систем обнаружения вторжений). [2].

Анализ, проведенный в [2-5], показывает, что имеющиеся в настоящий момент научные проработки в области построения СЗИ не лишены недостатков, приводящих к отсутствию единых и универсальных подходов к решению задачи оценки эффективности СЗИ, препятствующих адекватному сравнению различных вариантов СЗИ с целью сделать обоснованный выбор наиболее приемлемого. Кроме того, новизна направления сетецентричного имитационного моделирования РТК с применением виртуального полигона, накладывает свои особенности в виде недостаточной изученности и формализованности возможных угроз и рисков.

Одним из ключевых показателей ИС является адекватность функционирования подсистемы защиты. Отсюда вытекает важнейший вопрос оценки эффективности используемых методов защиты, в итоге определяющих качество СЗИ. Эффективность СЗИ должна учитывать не только характеристики функций барьерной защиты и сложность их преодоления, но и динамические возможности обнаружения и реагирования на атаки, при отсутствии нарушений функционирования подсистем ИС и значительной потери ее характеристик.

Результаты оценки определяют степень пригодности возможных методов защиты, позволяя обеспечить необходимый уровень контроля и снизить возможные риски.

Метод аналитической иерархии Саати

Среди методов анализа иерархий (МАИ), наиболее известен метод, разработанный Т. Саати, дающий возможность выбора наилучшей альтернативы. Данный метод использует попарное сравнение заданных альтернатив на основе созданной экспертами иерархии критериев и подчиненных им альтернатив, описывающих исследуемую проблему, даже плохо формализуемую.

Основные этапы метода анализа иерархий Т. Саати:

- построение иерархии путем разложения проблемы (цели) на составляющие (критерии) опирающиеся через промежуточные составляющие на перечень простых альтернатив;
- экспертная оценка важности альтернатив с помощью метода парных сравнений;
- оценка локальных приоритетов сравниваемых элементов;
- проверка согласованности локальных приоритетов;
- иерархическое решение проблемы.

Результаты попарного сравнения характеристик описываются отношениями их весов, т.е. представимы в виде матрицы А:

$$A = ||\lambda i / \lambda J||; i,j \epsilon n \quad (1)$$

$$(A - nE)\lambda` = 0 \quad (2)$$

где E – единичная матрица;
$\lambda`$ – вектор весов.

Для того чтобы найти вектор весов, необходимо решить уравнение (2). Матрица имеет ранг равный 1, n – единственным личным числом этой матрицы. Следовательно, уравнение имеет нулевое решение. Кроме того, это единственное решение, имеющее свойство:

$$\sum \lambda 1 = 0 \quad (3)$$

Данный вектор является вектором Саати.

Метод, на основе построенной иерархии, содержит процедуру оценки важности альтернатив (синтез приоритетов), в процессе которой, на основе субъективных суждений экспертов, определяется попарно их значимость. Число

суждений может быть весьма велико и объем математических вычислений для подобных задач большой размерности диктует целесообразность использовать программное обеспечение для ввода и обработки суждений. На данный момент МАИ реализован во многих пакетах прикладных программ, например MPRIORITY, Expert Choice, СППР «Выбор», SuperDecisions, и т.п.

Возможные угрозы информационной безопасности ВП

Информационные системы имеют три основных вектора угроз: утечка информации, искажение информации, нарушение функционирования. В применении к структуре, задачам и процессам ИС ВП, это дает нижеследующие основные виды предполагаемых угроз [3]:

Утечка информации:

1. Утечка параметров моделей, структур виртуальных РТС, составляющих как коммерческие, так и военные секреты;
2. Утечка информации о процессах, порядке и условиях моделирования, в том числе групповых РТС;
3. Утечка информации об основных результатах моделирования РТС;
4. Утечка информации о результатах анализа массива данных, собранного в процессе моделирования РТС;
5. Утечка информации о групповом составе РТС участников моделирования;
6. Утечка информации о применяемых методиках и сценариях моделирования;
7. Утечка информации о методиках анализа, применяемых в процессе моделирования и по итоговым результатам;

Искажение информации:

8. Искажение исходных данных, применяемых моделей и их частей, справочников и таблиц, критических условий и т.п.;
9. Искажение информации, циркулирующей на ВП в процессе моделирования;
10. Искажение информации, собранной в итоге процесса моделирования;
11. Искажение результатов проведенного анализа по результатам цикла моделирования;

Нарушение функционирования:

12. Нарушение внутренних процессов подготовки, проведения и завершения цикла моделирования на ВП;
13. Нарушение порядка и способа взаимодействия внутренних подсистем ВП;
14. Нарушение порядка и способа взаимодействия внешних терминалов и подсистем ВП;
15. Нарушение работоспособности серверов, терминалов и прочего оборудования системы ВП.

Предлагаемая последовательность действий

Рассмотрим порядок действий по оценке методов противодействия угрозам ИБ ВП более подробно.

1) Эксперты определяют относительный «вес» критериев источников угроз информационной безопасности ВП, руководствуясь косвенными показателями, такими как:

- Вероятность возникновения источника угроз;
- Возможность реализации угрозы;
- Вероятный ущерб, нанесенный реализованной угрозой.

Эксперты оценивают вероятность реализации и ущерб от каждой угрозы относительно всех угроз информационной безопасности, с учетом возможных методов противодействия.

Проводится попарное сравнение перечисленных ранее критериев по предложенной Саати шкале следующего типа:

1 – равный вес критериев, и при сравнении элемента с самим собой;

3 – некоторое превышение веса одного критерия над другим;

5 – заметное превышение веса одного критерия над другим;

7 – значительное превышение веса одного критерия над другим;

9 – подавляющее превышение веса одного критерия над другим.

Таблица 1

Относительные экспертные веса критериев

	A1	A2	A3	A4
A1	1	1/3	1/9	1/7
A2	3	1	1/9	1/5
A3	9	9	1	1/3
A4	7	5	3	1

Таблица 2

Относительные веса критериев с нормированием

	A1	A2	A3	A4	произведение	вектор	нормированный вектор
A1	1	0,33	0,11	0,14	0,005291005	0,26970224	0,043094247
A2	3	1	0,11	0,2	0,066666667	0,50813275	0,081191755
A3	9	9	1	0,33	27,00	2,27950706	0,364229977
A4	7	5	3	1	105	3,20108587	0,511484021
сумма						6,25842792	1,0

При этом важно правильно сформулировать вопрос для парных сравнений в каждой матрице и обеспечить одинаковость смысловой направленности каждого из вопросов по шкале «больше-лучше». Например, цена, ущерб, вероятности возникновения и реализации угроз должны снижаться, а эффективность расти.

Подсчитанные параметры сводятся в таблицу относительных весов критериев (пример в *таблице 1*).

Затем простые дроби переводятся в десятичные и подсчитываются строчные суммы. Результат показан в *таблице 2*.

Вычисление вектора приоритетов по каждой строке производится умножением n элементов каждой строки и извлечением корня n-й степени. В случае слишком большой размерности, можно использовать менее точный способ суммирования значений. Полученные значения нормализуются. Правый столбец в таблице 2 получается в результате нормирования произведений значений по строке так, чтобы их сумма в свою очередь была равна единице. Для этого нужно разделить вектор в каждой строке на их сумму (6,26). В результате нормирования получаем относительные оценки значимости по всем критериям. Обязательно нужно подчеркнуть, что полученные оценки отражают субъективную точку зрения конкретного эксперта.

На основе составленной матрицы парных сравнений, необходимо провести расчет и оценку индекса согласованности (ИС). Для этого по формуле (4) определяется ИС матрицы, который в дальнейшем сравнивается со средним ИС, посчитанным для случайных матриц того же порядка

$$ИС = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1}, \qquad (4)$$

где λ_{max} – максимальное собственное значение;
n – размерность матрицы.

Соотношение этих индексов является отношением согласованности (ОС), отражающей пропорциональность предпочтений.

Умножив матрицу сравнений на полученную оценку вектора решения, получим новый вектор. Последовательным делением первой компоненты этого вектора на первую компоненту оценки вектора решения, второй компоненты нового вектора на вторую компоненту оценки вектора решения и далее, до границы размерности матрицы, определим еще один вектор. Делением суммы компонент этого вектора на общее число компонент, получаем приближение к числу λ_{max}. Чем ближе λ_{max} к размерности матрицы, тем более согласованным является результат.

Рассчитанные Саати индексы согласованности для случайных обратно симметричных матриц размерностью от 1 до 15, приведенные в *таблице 3*, берутся за основу при оценке полученных матриц на предмет согласованности. Обычно, при анализе экспертных данных, матрица не является полностью согласованной. В своей работе Т. Саати считает приемлемым значение ОС меньшее или равное 0.10 [6].

На основе окончательного ранжирования объектов эксперт делает выводы о степени эффективности оцениваемых методов защиты в заданных условиях.

Опираясь на данные окончательного ранжирования, оценивается возможная приоритетность использования методов повышения защищенности ИС ВП.

Необходимо учитывать, что выявлены возможные недостатки метода анализа иерархий Саати [7], которые заключаются в большой вероятности логических ошибок, возникающих при оценках попарного сравнения значительного количества очень сложных элементов в не связанных ни между собой, ни с приоритетами критериев, шкалами отношений. Предложено использовать шкалу «абсолютной важности элементов» с целью упрощения расчетов при обработке оценок и исключения формальных рассогласований в ответах экспертов.

Заключение

В данной работе кратко описано возможное применение метода анализа иерархий Т.Саати для оценки эффективности методов защиты информации, приведены основные угрозы информационной безопасности ВП.

Рассмотренный метод анализа иерархий, примененный в целях оценки эффективности методов защиты информации, позволил структурировать проблему, построить набор альтернатив, выделить характеризующие их факторы, оценить альтернативы по каждому из факторов, определить согласованность мнений эксперта, проранжировать альтернативы, провести анализ решения и обосновать полученные результаты.

Таблица 3

Средние случайные индексы согласованности для матриц разного порядка

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

Литература

1. Умников Е.В., Грачёв В.А., Мурашов А.Г. Концепция многоцелевого виртуального робототехнического полигона / Материалы Одиннадцатой Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления»; Южный федеральный университет // Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2016. Т.2.
2. Чемин А.А. Разработка методов оценки эффективности систем защиты информации в распределенных информационных системах специального назначения. Дисс. на соиск. … канд. тех. наук. М., 2009.
3. Умников Е.В., Атакищев О.И., Ванюшин В.М., Грачёв В.А. Особенности обеспечения информационной безопасности при моделировании РТК с помощью виртуального полигона // Известия Института инженерной физики, 2021. №1 (59). С.66-72.
4. Маслова Н.А. Методы оценки эффективности систем защиты информационных систем // Штучний інтелект. Донецк, 2008. №4.
5. Панин О. Проблемы оценки эффективности функционирования систем физической защиты объектов // БДИ, 2007. №3.
6. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.
7. Подиновский В.В., Подиновская О.В. О некорректности метода анализа иерархий // Проблемы управления, 2011. №1. С.8-13.
8. Чусавитин М.О. Использование метода анализа иерархий при оценке рисков информационной безопасности образовательного учреждения // Фундаментальные исследования, 2013. №10-9. С. 2080-2084.
9. Умников Е.В., Царьков А.Н., Грачёв В.А., Атакищев О.И. Методы оценки эффективности интеллектуальных систем управления в применении к имитационному моделированию робототехнических комплексов // Известия Института инженерной физики, 2018. №2(48). С.76-82.
Умников Е.В. Вопросы технической организации взаимодействия моделей интеллектуальных систем управления, при имитационном моделировании функционирования роботов с применением виртуального полигона // Сборник материалов 29-й Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника», 2018.
11. Muniz J., McIntyre G., AlFardan N. Security Operations Center. Building, Operating, and Maintaining your SOC. Cisco Press. 448 p.

УДК 615.2, 615.31

О ПОДХОДАХ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЧИСТОЙ НАТРИЕВОЙ СОЛИ ЛЮМИНОЛА (3-АМИНОФТАЛГИДРАЗИД НАТРИЯ, 5-АМИНО-2,3-ДИГИДРО-1,4-ФТАЛАЗИНДИОН НАТРИЯ) – ОСНОВЫ ЛЕКАРСТВЕННОГО ПРЕПАРАТА ТАМЕРОН

ON APPROACHES TO OBTAINING HIGH-PURITY SODIUM SALT OF LUMINOL (3-AMINOPHTHALHYDRAZIDE SODIUM, 5-AMINO-2,3-DIHYDRO-1,4-PHTHALAZINEDIONE SODIUM) – THE BASIS FOR DRUG TAMERON

Артём Михайлович Ермаков
кандидат биологических наук
ведущий специалист-исследователь
отдела химико-биологических исследований
МОУ «ИИФ»
ведущий научный сотрудник
Институт теоретической и
экспериментальной биофизики РАН
Адрес: 142290, Московская обл.,
г. Пущино, ул. Институтская, д. 3
Тел. +7 (4967) 73-94-28
E-mail: ao_ermakovy@rambler.ru

Ольга Павловна Горло
начальник
Фармацевтического производственного центра
МОУ «ИИФ»
врач-терапевт
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,
Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967) 35-31-93
E-mail: opgorlo@iifmail.ru

Юлия Валерьевна Краснова
кандидат технических наук
главный технолог фармацевтического
производства
МОУ «ИИФ»
Тел.: +7(4967) 35-31-93
E-mail: iuvkrasnova@iifmail.ru

Владимир Станиславович Вольский
кандидат химических наук
ведущий научный сотрудник
отдела медико-биологический исследований МОУ «ИИФ»
Тел.: +7(4967) 35-31-93
E-mail: vsvolskii@iifmail.ru

Михаил Абрамович Презент
кандидат химических наук
научный сотрудник
ИОХ РАН им. Н.Д. Зелинского
Адрес: 119991, Москва, Ленинский проспект, д. 47
Тел.: +7 (903)793-89-62
E-mail: pre1962@mail.ru

Алексей Николаевич Царьков
заслуженный деятель науки РФ
доктор технических наук, профессор
Президент Института –
Председатель Правления Института МОУ «ИИФ»
Тел.: +7(4967) 35-31-93
E-mail: info@iifmail.ru

Денис Сергеевич Руднев
генеральный директор АО «Столетика»
Адрес: 142211, Московская обл., г. Серпухов,
Московское ш., д. 42, кв. 106
Тел.: +7(985) 090-07-52
E-mail: Denissrudnef@gmail.com

Аннотация

В статье рассматривается проблема химического синтеза особо чистого 5-амино-2,3-дигидро-1,4-фталазиндион натрия (люминола натрия). Последнее вещество является основой для получения активной фармацевтической субстанции и препарата **ТАМЕРОН**. В рамках выполнения субсидии Минпромторга России (Соглашение от 29.06.2021г. №020-11-2021-1094) в МОУ «ИИФ» был разработан новый экологичный, безопасный и эффективный способ синтеза высокочистого 5-амино-2,3-дигидро-1,4-фталазиндиона натрия, который был оформлен в виде ноу-хау.

Ключевые слова: ТАМЕРОН (5-амино-2,3-дигидро-1,4-фталазиндион натрия, люминол натрия), 5-амино-2,3-дигидро-1,4-фталазиндион (люминол), химический синтез, ноу-хау.

Summary

The article deals with the problem of chemical synthesis of highly pure 5-amino-2,3-dihydro-1,4-phthalazinedione sodium salt (luminol sodium salt). The latter substance is the basis for obtaining the active pharmaceutical substance and **TAMERON**. As part of the implementation of the subsidy of the Ministry of Industry and Trade of Russia (Agreement No. 020-11-2021-1094 dated June 29, 2021), a new environmentally friendly, safe and efficient method for the synthesis of high-purity 5-amino-2,3-dihydro-1,4- phthalazinedione sodium salt, which was designed as a know-how.

Keywords: TAMERON (5-amino-2,3-dihydro-1,4-phthalazinedione sodium salt, luminol sodium salt), 5-amino-2,3-dihydro-1,4-phthalazinedione (luminol), chemical synthesis, know-how.

В настоящее время известны методики синтеза 5-амино-2,3-дигидро-1,4-фталазиндиона натрия используют сложные и трудоемкие процессы, чистый гидразин, высокие температуры и специальные условия проведения реакции.

Например, в патенте RU2113222C1 описано получение натриевой соли люминола путем нагрева на водяной бане смеси 2-нитрофталгидазида и раствора NaOH в дистиллированной воде в присутствии катализатора, например никель-алюминиевого сплава [1]. Также был описан близкий к предлагаемому методу синтеза способ получения люминола натрия, где 5-амино-2,3-дигидрофталазин-1,4-дион подвергают взаимодействию с едким натрием в водной среде. При этом нет описания продолжительности синтеза, и способа выделения искомого вещества из раствора и его очистки [2].

В патенте RU2155043C1 описан способ получения натриевой соли 5-амино-2,3-дигидрофтализин-1,4-диона, включающем восстановление продукта гидразингидратом в присутствии скелетного никелевого катализатора, вначале взаимодействием 3-нитрофталевого ангидрида с гидразингидратом в уксусной кислоте при температуре 90-120°С получают 5-нитро-2,3-дигидрофталазин-1,4-дион, после восстановления которого гидразингидратом в водно-щелочной среде в присутствии скелетного никелевого катализатора выделяют 5-амино-2,3-дигидрофталазин-1,4-дион, который затем обрабатывают при температуре 20 - 80°С с гидроксидом натрия с добавлением низшего спирта или кетона и выделяют целевой продукт [3].

Для синтеза щелочных и щелочноземельных солей люминола также предлагалось использовать 5-амино-2,3-дигидро-1,4-фталазиндион и взаимодействие его с алкоголятами соответствующих металлов в безводной спиртовой среде при нагревании 5-амино-2,3-дигидро-1,4-фталазиндиона [4].

В патенте RU2211036C2 описан способ получения солей щелочных металлов люминола воздействием водного раствора гидроксида щелочного металла на исходный состав, содержащий 5-амино-2,3-дигидро-1,4-фталазиндион, с последующим осаждением с использованием органического растворителя полученного в результате этого воздействия промежуточного состава в виде щелочной соли 5-амино-2,3-дигидро-3-дигидро-1,4-фталазиндиона [5]. При этом в описании способа получения не используются промывки растворителями для повышения степени чистоты получаемого продукта.

В рамках выполнения субсидии Минпромторга России (Соглашение от 29.06.2021 г. №020-11-2021-1094) в МОУ «ИИФ» был разработан новый способ синтеза особочистого 5-амино-2,3-дигидро-1,4-фталазиндиона натрия, который был оформлен в виде ноу-хау.

Разработанный способ получения 5-амино-2,3-дигидро-1,4-фталазиндиона натрия отличается новизной и экологичностью, так как не использует в синтезе гидразин и высоких температур. Реакция проходит в водной среде и реакционная смесь не содержит токсичных растворителей. Используемые для осаждения люминола натрия высоколетучие нетоксичные органические соединения после просушки полностью покидают конечный продукт, который в итоге не содержит определяемых следов этих растворителей. Получаемый 5-амино-2,3-дигидро-1,4-фталазиндион натрия представляет собой высокочистую, пригодную для фармакологического использования активную фармацевтическую субстанцию.

Литература

1. Патент № RU2113222C1. Иммуномодулирующее средство, Российская Федерация. Патентообладатель: Закрытое акционерное общество «Центр современной медицины «Медикор»», приоритет 30.09.1997, не действует.
2. Патент № RU2130775C1. Способ ранней диагностики злокачественных опухолей органов и тканей (его варианты) – способ Даабуля и вещество для его осуществления. Патентообладатель: Товарищество с ограниченной ответственностью «Кинда», приоритет 1997-06-10, не действует.
3. Патент № RU2155043. Способ получения лекарственного препарата. Патентообладатель: Абидов М.Т., приоритет 28.03.2000, не действует.
4. Патент № RU2169139. Способ получения щелочных или щелочноземельных солей 5-амино-2,3-дигидро-1,4-фталазиндиона. Патентообладатель: Закрытое акционерное общество «Центр современной медицины «Медикор»», приоритет 02.08.2000, не действует.
5. Патент № RU2211036C2. Лекарственный препарат (варианты) и способ его производства. Патентообладатель: Общество с ограниченной ответственностью «Абидофарма», приоритет 20.11.2001, не действует.

УДК 303.732; 378.1

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УДОВЛЕТВОРЕННОСТИ КУРСАНТОВ СИСТЕМОЙ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ В ВОЕННОМ ВУЗЕ

METHODOLOGY FOR ASSESSING CADETS SATISFACTION WITH THE SYSTEM OF TRAINING SPECIALISTS IN A MILITARY UNIVERSITY

Сергей Геннадьевич Дранников
специалист
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93

Аннотация

В статье представлена методика оценки удовлетворенности курсантов системой подготовки специалистов в военном вузе МО. Разработана система оценки качества образовательной деятельности военного вуза МО с подсистемой по оценке удовлетворенности курсантов, которая включает такие составляющие, как объект управления; блок «Оценка результатов»; управляющая система. Разработаны алгоритм и методика оценки удовлетворенности курсантов системой подготовки военного вуза МО.

Ключевые слова: удовлетворенность потребителей, качество образовательной деятельности, военный вуз, удовлетворенность курсантов системой подготовки специалистов в военном вузе, оценка удовлетворенности.

Summary

The article presents a methodology for assessing the satisfaction of cadets with the system of training specialists in the military university of the Ministry of Defense. A system for assessing the quality of educational activities of a military university of the Ministry of Defense with a subsystem for assessing the satisfaction of cadets has been developed, which includes such components as the control object; the block «Evaluation of results»; the control system. An algorithm and methodology for assessing the satisfaction of cadets with the training system of the military university of the Ministry of Defense have been developed.

Keywords: taking decision, quality of educational activities, methods of satisfaction assessment.

В менеджменте качества оценка удовлетворенности потребителей рассматривается как составная часть системы оценки качества деятельности организации. Под удовлетворенностью потребителя понимают восприятие потребителем степени выполнения его ожиданий или требований [20]. В соответствии с организационно-методическими указаниями Главного управления кадров Министерства обороны РФ по организации и ведению образовательного процесса в высшем военно-учебном заведении Минобороны России [18] неотъемлемой частью его деятельности является контроль качества подготовки, текущий и итоговый контроль успеваемости.

К основным показателям качества подготовки выпускников военных вузов Минобороны (МО) России относятся:

- степень выполнения государственного кадрового заказа по данной специальности (направлению подготовки);
- уровень соответствия выпускников требованиям федеральных государственных образовательных стандартов и Квалификационным требованиям к военно-профессиональной подготовке выпускников по специальности, который может быть представлен средним баллом по результатам защиты выпускных квалификационных работ выпускников.

С учетом вышеприведенной информации, анализа работ [1-12, 14-17] разработана методика оценки качества образовательной деятельности военного вуза МО с подсистемой по оценке удовлетворенности курсантов (*рисунок 1*), которая включает такие составляющие, как:

- объект управления;
- блок «Оценка результатов»;
- управляющая система.

Объект управления образовательной деятельностью вуза – это объект, который преобразует исходное состояние подготовки абитуриентов

военных вузов в конечное состояние выпускников-офицеров за годы обучения курсантов на 1-5 курсах по соответствующим специальностям. Основным элементом объекта управления являются «Курсанты 1-5 курсов», остальные элементы объекта ориентированы на обучающихся курсантов, к ним относятся основные образовательные программы (ООП); результаты образовательной деятельности (ОД), такие, как компетенции, знания, умения, навыки; организация учебной работы (УР); организация самостоятельной работы (СР); организация воспитательной и внеучебной работы (ВВР); квалификация профессорско-преподавательского состава (ППС); учебно-методическое обеспечение (УМО); организация научно-исследовательской деятельности (НИД); учебно-материальная база (УМБ); организация практик и стажировок; организация питания; организация проживания и др. К основным входным воздействиям объекта управления **Wвх** относят: требования национальных нормативно-правовых документов (в том числе федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования); требования МО России, представленные в соответствующих Квалификационных требованиях к военно-профессиональной подготовке выпускников (КТВППВ); государственный кадровый заказ, начальный уровень подготовки принятых на обучение курсантов и т.д.

За определенный период обучения (семестр, курс) компетенции, знания умения, навыки, личностные качества курсантов изменяются с начального уровня на текущий и характеризуются вектором **X**.

Блок «Оценка результатов» предназначен для объективного оценивания сформированности компетенций курсантов и их составляющих по итогам промежуточной и итоговой аттестации, а также для оценки удовлетворенности курсантов качеством образовательной деятельности военного вуза МО. Результатом процесса «оценка результатов» является значения вектора **Yвых** как совокупность оценок результатов учебных достижений и оценок удовлетворенности курсантов.

Управляющая система сравнивает значения вектора **Y*** (планируемые, целевые значения результатов учебных достижений и оценок удовлетворенности курсантов) со значениями вектора **Yвых** и формирует управленческие воздействия **U** на объект управления, направленные на совершенствование образовательного процесса.

На основе предложенной системы оценки качества образовательной деятельности военного вуза МО и удовлетворенности курсантов разработан алгоритм оценки удовлетворенности курсантов системой подготовки специалистов военного вуза МО, который включает:

- формирование исходных данных для оценки удовлетворенности курсантов;
- совокупность последовательно-итерационных процедур по оценке удовлетворенности курсантов.

Формирование исходных данных для оценки удовлетворенности курсантов включает:

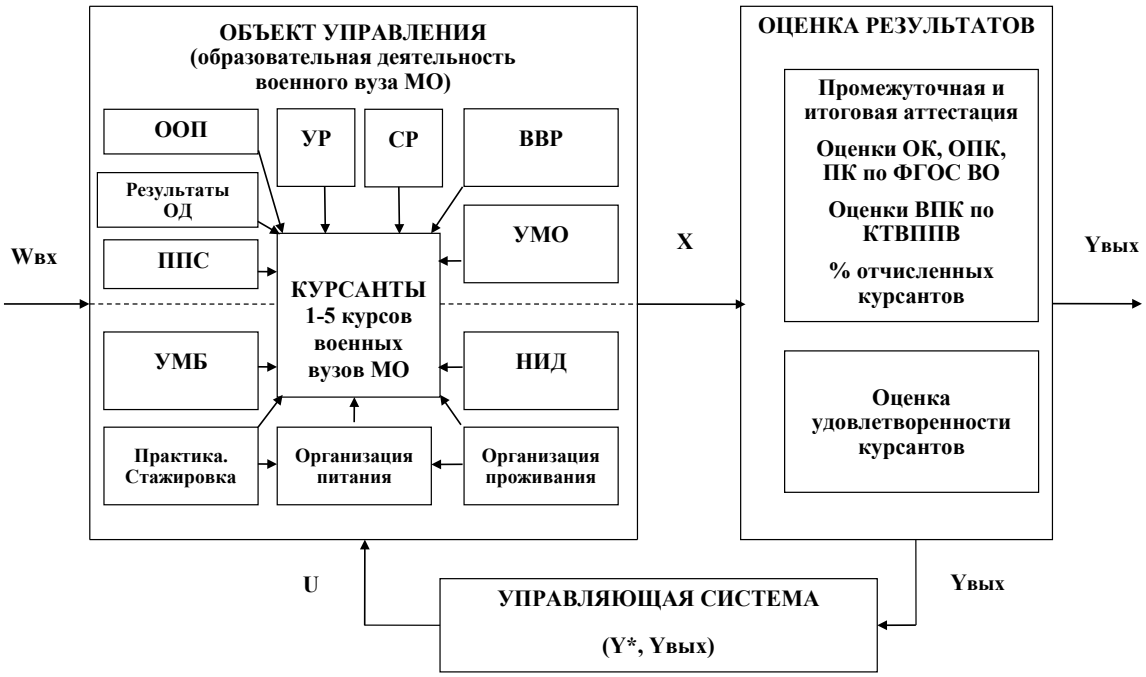


Рис. 1. Система оценки качества образовательной деятельности военного вуза МО и удовлетворенности курсантов

- обоснование периодичности Т оценки удовлетворенности курсантов;
- обоснование вида и информативности шкалы оценивания удовлетворенности курсантов (ОУК);
- обоснование совокупности показателей ОУК **Pi**;
- обоснование репрезентативности выборки;
- выбор метода квалиметрической оценки;
- обоснование метода определения весовых коэффициентов показателей качества.

Обоснование периодичности Т оценки удовлетворенности курсантов. В качестве характерных периодов оценки удовлетворенности курсантов рассматривались: семестр – 6 месяцев, курс – учебный год, период обучения по образовательной программе – 5 лет. Предварительно считалось, что семестр – период с очень мелким шагом, проведение процедуры будет отнимать много временных и человеческих ресурсов, кроме того, большое количество учебных дисциплин изучаются в течение нескольких семестров. Другая крайность – оценка удовлетворенности курсантов в конце срока обучения. Выявленные недостатки образовательной деятельности вуза уже не могут быть устранены, у такого подхода к оценке удовлетворенности обучением очень большая инерционность. Таким образом, рекомендуемой периодичностью ОУК является учебный год (курс).

Обоснование вида и информативности шкалы оценивания удовлетворенности курсантов. Оценка удовлетворенности курсантов системой подготовки специалистов в военном вузе может осуществляться в баллах. Такой тип измерений относится к качественным измерениям, для которых применяется порядковая шкала (шкала порядка).

Если свойство объекта проявляет себя в отношении эквивалентности и порядка по возрастанию или убыванию качественного проявления свойства, то для него может быть построена шкала порядка. Шкала порядка является монотонно возрастающей или убывающей и позволяет установить отношения «равно»/«больше»/«меньше» между величинами, характеризующими указанное свойство.

Применение порядковой шкалы, в которой измеряются качественные величины, предопределяет выбор непараметрических методов математической статистики для релевантной обработки результатов оценивания точки зрения опрашиваемых (курсантов) [13,17]. В случае, если измеряются количественные величины, например, с использованием шкалы отношений, рекомендуется использовать параметрические методы математической статистики.

В зависимости от количества используемых градаций свойства различают:

- малоинформативные порядковые шкалы (как правило, бинарные: соответствует – не соответствует, удовлетворен – не удовлетворен). Широко применяются в области оценки качества, но не отвечают на вопрос, на сколько высоким или низким является установленное соответствие / удовлетворенность;
- порядковые шкалы средней информативности (как правило, четырех или пятибалльные шкалы). Широко используются из-за простоты описания небольшого количества градаций, таких как «не удовлетворен» «слабо удовлетворен», «удовлетворен», «очень удовлетворен». Недостатком шкал являются их ограниченные возможности при проведении статистического анализа;
- высокоинформативные порядковые шкалы (7-балльная шкала Лайкерта, 10-балльная шкала, шкалы с более высокой градацией признака). Увеличение количества градаций затрудняет их описание, но увеличивает «точность» оценивания и повышает возможности статистического анализа.

Обоснование совокупности показателей ОУК $\mathbf{P_i}$. Ввиду того, что процесс подготовки специалиста военного вуза МО является сложным и многогранным, то оценить качественные и количественные параметры его динамики довольно сложно. Поэтому необходимо разработать показатели оценки удовлетворенности курсантов. Под показателями понимается совокупность объективных и субъективных показателей, дающих качественную характеристику ее состояния, опираясь на которые можно выявить ее существенные свойства и меру проявления в деятельности [19].

Обоснование репрезентативности выборки. Оценка удовлетворенности курсантов – трудоемкая процедура, поэтому предлагается проводить оценивание не на всей генеральной совокупности (общем количестве курсантов (учебных групп) военного вуза МО, относительно которых предполагается делать выводы при изучении конкретной задачи) а на выборке (или выборочной совокупности) – части генеральной совокупности, которая охватывается наблюдением, опросом).

Выбор метода квалиметрической оценки. Основными методами оценки качества объектов являются дифференциальный и комплексный, на основе которых разрабатываются вариации смешанного метода [4].

Дифференциальный метод предполагает вы-

числение значений относительных показателей качества q_i по формуле

$$q_i = \frac{p_i}{p_{iб}}, i = 1,2...,n, \quad (1)$$

где P_i – значение i-го показателя качества объекта;

$P_{iб}$ – значение i-го базового показателя;

n – количество показателей качества объекта.

Формула (1) используется в случае, если увеличение значения показателя качества приводит к улучшению качества объекта. Дифференциальный метод применяется, если количество показателей качества объекта не велико (не более четырех).

Комплексный метод применяется, если качество объекта характеризуется одним обобщенным показателем, являющимся функцией от единичных (групповых или комплексных) показателей. Обобщенный показатель может быть выражен главным, интегральным или средним взвешенным показателем качества объекта. В случае оценки удовлетворенности курсантов выделить один главный или интегральный показатель не представляется возможным, поэтому в дальнейшем для квалиметрической оценки удовлетворенности используется средний взвешенный показатель. Средневзвешенный показатель Q вычисляют по формуле

$$Q = \sum_{i=1}^{n} m_{i(Q)} P_i, \quad (2)$$

где $m_{i(Q)}$ – параметр весомости i-го показателя, входящего в обобщенный показатель Q.

Параметр весомости может быть размерным и безразмерным. В случае, если выполняется условие

$$\sum_{i=1}^{n} m_i = 1, \quad (3)$$

параметры весомости называются коэффициентами весомости.

Обоснование метода определения весовых коэффициентов показателей удовлетворенности. Сравнительный анализ методов определения коэффициентов весомости показателей удовлетворенности объекта представлен в работе [5].

Если объект характеризуется количеством свойств, превышающих десять наименований, а количество экспертов (опрашиваемых курсантов) превышает пять человек, процедуры расчета коэффициентов весомости являются громоздкими, поэтому в исследовании для определения весовых коэффициентов показателей удовлетворенности предложен метод непосредственного оценивания определения весовых коэффициентов показателей качества с их последующим нормированием до выполнения условия (3), в соответствии с которым сумма значений коэффициентов весомости равна единице

С учетом формирования исходных данных разработан алгоритм для оценки удовлетворенности курсантов, представленный на *рисунке 2*.

Алгоритм реализуется выполнением следующих процедур:

2 – формирование исходных данных;

3 – ввод граничных значений показателей удовлетворенности (ПУ); по экспертной оценке специалистов в области СМК, при десятибалльной оценке ПУ граничным значением считается значение показателя удовлетворенности *Pimp*=6;

4-6 – проведение анкетирования курсантов, входящих в выборку: 4 – сбор индивидуальных данных курсантов о значимости каждого из ПУ на основе анкетирования;

5 – сбор данных об оценке каждого ПУ курсантов на основе анкетирования;

6 – сбор предложений курсантов о повышении качества деятельности военного вуза МО;

7 – расчет значений весовых коэффициентов ПУ на основе информации блока 4 методом непосредственного оценивания с последующим нормированием для выполнения условия (2);

8 – расчет оценок ПУ как параметров математической статистики на основе информации блока 5;

9 – сравнение показателей удовлетворенности курсантов с граничными значениями, анализ выполнения условия **Pigp≤Pid –** граничное значение ПУ меньше действительного;

10 – при невыполнения условия по блоку 9 выясняются причины низкой удовлетворенности курсантов конкретным (конкретными) ПУ на основе дополнительного собеседования или анкетирования;

11 – при выполнения условия по блоку 9 рассчитывается обобщенное значение удовлетворенности курсантов обучением в ввузе МО;

12 – по результатам информации блока 10 формируются предложения по повышению удовлетворенности курсантов;

13 – на основе информации по блокам 6, 11, 14 формируется баз данных оценок удовлетворенности курсантов качеством образовательной деятельности вуза МО и предложений курсантов по совершенствованию образовательной деятельности;

14 – на основе анализа базы данных оценок удовлетворенности курсантов качеством образовательной деятельности вуза МО, предложений курсантов по совершенствованию образовательной деятельности, сравнения аналогичных оценок удовлетворенности курсантов с предыдущим периодом формируются управленче-

ские воздействия, направленные на совершенствование образовательной деятельности военного вуза МО.

Таким образом, разработанная система оценки качества образовательной деятельности военного вуза МО с подсистемой по оценке удовлетворенности курсантов и методика оценки удовлетворенности курсантов системой подготовки специалистов в военном вузе МО позволяет экспериментально установить значения весовых коэффициентов показателей удовлетворенности, определить совокупность численных значений показателей удовлетворенности курсантов системой подготовки в военном вузе, выявить сильные и слабые стороны образовательной деятельности, сформировать предложения, направленные на повышение качества образовательной деятельности военного вуза МО.

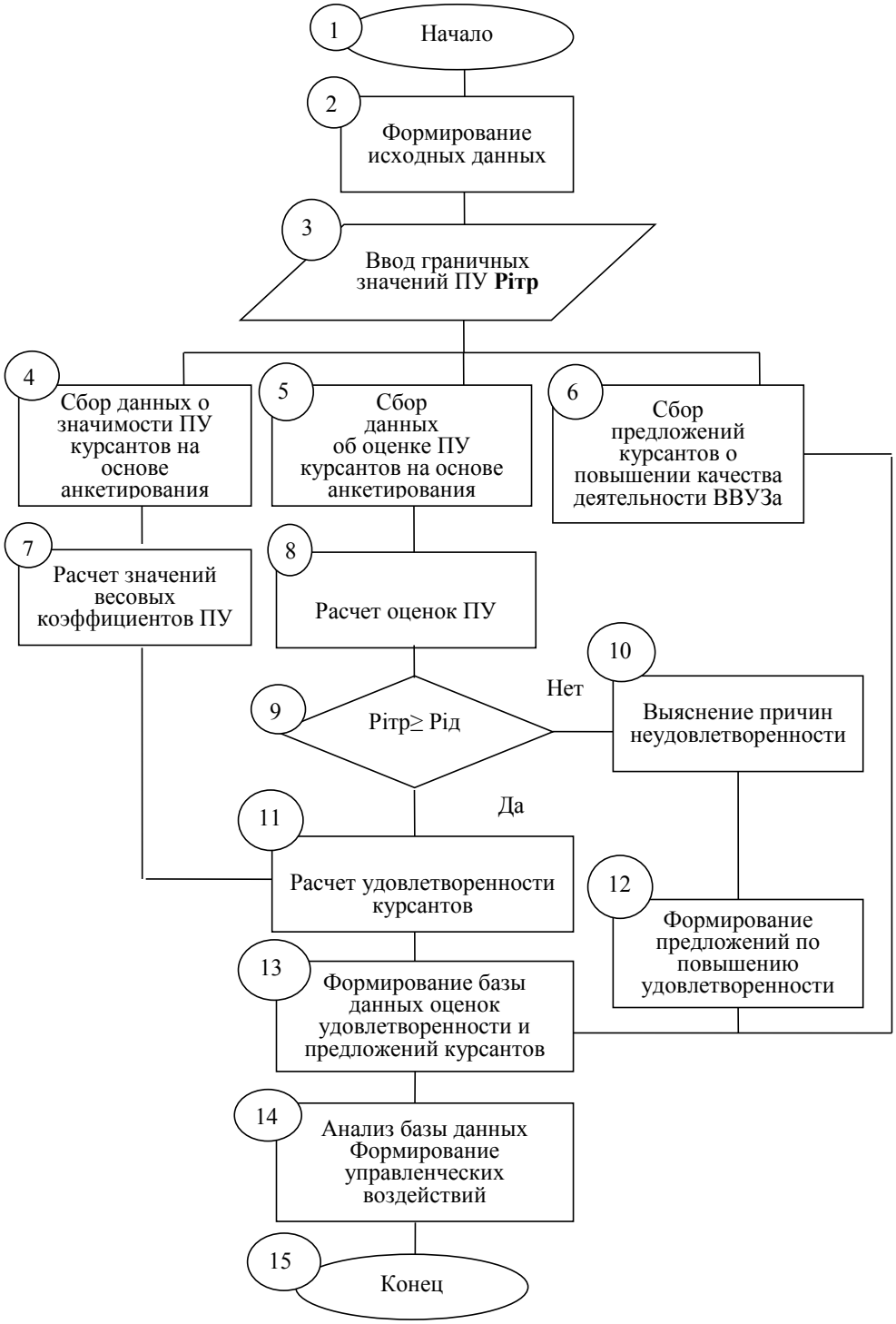
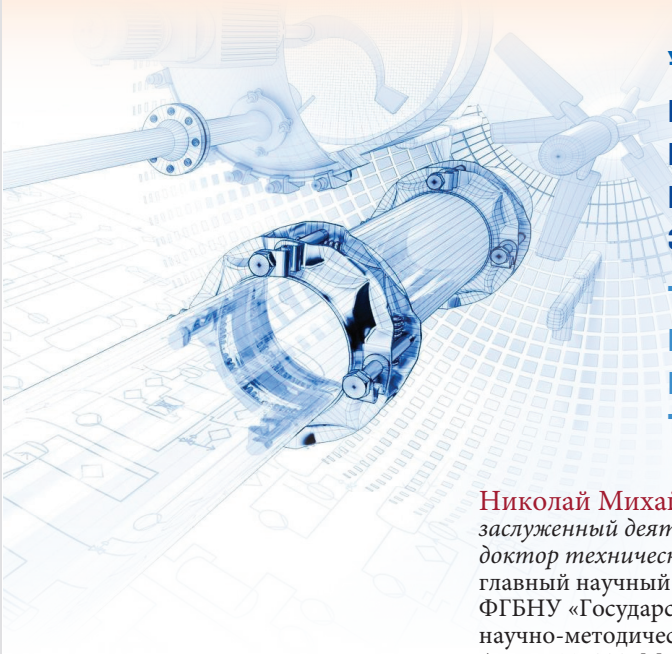


Рис. 2. Алгоритм для оценки удовлетворенности курсантов качеством образовательной деятельности военного вуза МО

Литература

1. Андрух О.Н., Дранников С.Г. Анализ современных подходов к мониторингу удовлетворенности потребителей качеством образовательной деятельности вуза // Известия Института инженерной физики, 2019. №1(51). С.86-91.
2. Андрух О.Н., Дранников С.Г. Место оценки удовлетворенности потребителей в независимой оценке качества образования // Сборник трудов участников VI ВНПК «Современное непрерывное образование и инновационное развитие» // Под ред. проф. А.Н.Царькова и проф. И.А.Бугакова. Серпухов: МОУ «ИИФ», 2016. С.358-360.
3. Андрух О.Н., Дранников С.Г. Оценка удовлетворенности потребителей в сфере высшего образования // Сборник трудов участников VI ВНПК «Современное непрерывное образование и инновационное развитие» // Под ред. проф. А.Н.Царькова и проф. И.А.Бугакова. Серпухов: МОУ «ИИФ», 2016. С.361-363.
4. Андрух О.Н., Сидорова А.С. Квалиметрические методы оценки деятельности преподавателей вузов // Известия Института инженерной физики, 2015. №1(35). С.97-101.
5. Андрух О.Н., Сидорова А.С. Сравнительный анализ экспертных методов определения коэффициентов весомости компетенций преподавателей вузов // Сборник научных трудов Института инженерной физики (2014-2015 гг.). Вып. 4.// Под редакцией проф. А.Н.Царькова и проф. И.А.Бугакова. Серпухов: МОУ «ИИФ», 2015. С. 57-63.
6. Андрух О.Н., Чадунели М.К. Оценка удовлетворенности потребителей услуг в сфере профессионального образования // Известия Института инженерной физики, 2014. №1(31). С.94-97.
7. Беляков Б.Л., Воробьев В.А. Актуальные проблемы военно-профессионального образования в РВСН // Гуманитарный вестник, 2014. №3(30). С.8-17.
8. Виниченко А.В. Модель оценки качества военного образования в военных учебных заведениях // Динамика развития системы военного образования: Материалы II Международной научно-практической конференции. В 2-х частях, Омск, 13 марта 2020 года / Под общей редакцией К.В. Костина. Омск: Омский государственный технический университет, 2020. С.10-20.
9. Володина Е.Д.. Методика итеративного управления формированием в высшей школе кадрового потенциала науки: Дис. ... канд. тех. наук. Серпухов, 2014. 167 с.
10. Голуб В.В., Новиков В.И. Военно-ориентированное обучение в пространстве непрерывного военно-профессионального образования // Проблемы современного педагогического образования, 2020. №66-2. С.98-102.
10. Голуб В.В. Организационно-методологические аспекты моделирования пространства непрерывного военно-профессионального образования // Среднее профессиональное образование, 2018. №5. С.5-10.
11. Горбенко С.И. Управление качеством подготовки специалистов в условиях стандартизации образования: дис. ... канд. пед. наук: Ставрополь, 2002. 222 с.
12. Грабарь М.И., Краснянская К.А. Применение математической статистики в педагогических исследованиях. Непараметрические методы. М.: Педагогика, 1977. 136 с.
13. Иванов В.С. Педагогические основы эффективного управления системой военного образования в РВСН: дис. ... канд. пед. наук. Москва, 2000. 221 с.
14. Марченков В.И. Повышение эффективности военно-профессионального образования офицерских кадров в высших военно-учебных заведениях Министерства обороны Российской Федерации: дис.... докт. пед. наук. М.: 2005. 548 с.
15. Медведев Д.Н. Система оценки качества образовательного процесса в вузе: отечественный и зарубежный опыт // Вестник Тамбовского университета. Серия: Гуманитарные науки, 2013. №9(125). С. 88-95.
16. Новиков Д.А. Статистические методы в педагогических исследованиях (типовые случаи). М.: МЗ-Пресс, 2004. 67 с.
17. Приказ министра обороны РФ от 15.09.2014 №670.
18. Капустин В.Б. Профессиональная компетентность советских офицерских кадров. М.: 1992. 59 с.
19. ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь.



УДК 629.1

ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ БЕЗОШИБОЧНОСТИ ДЕЙСТВИЙ ПЕРСОНАЛА НА НАДЕЖНОСТЬ ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

THE APPROACHES TO ASSESSING THE IMPACT OF ERROR-FREE PERSONNEL PERFORMANCE TO THE RELIABILITY OF THE COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS

Николай Михайлович Емелин
заслуженный деятель науки и техники РСФСР
доктор технических наук, профессор
главный научный сотрудник
ФГБНУ «Государственный
научно-методический центр»
Адрес: 115998, Москва, ул. Люсиновская, д. 51
Тел.: +7 (499) 706-81-24

Аннотация
Статья содержит анализ подходов к оценке влияния безошибочности действий персонала на надежность эргатических систем. Рассматриваются показатели безошибочности действий персонала при выполнении работ и модель его «научения». Приводятся основные положения методики оценки влияния безошибочности действий персонала на надежность эргатических систем, базирующейся на теории марковских процессов с непрерывным временем.
Ключевые слова: марковские модели, показатели, эргатические системы, безошибочность, надежность.

Summary
The article describes an analysis of the approaches to assessing the impact of error-free personnel performance to the reliability of the complex technical systems. The indicators of error-free personnel performance and the model of their «learning» are viewed. The main clauses of the methodology for assessing the impact of error-free personnel performance to the reliability of the complex technical systems based on the theory of Markov processes with continuous time are presented.
Keywords: Markov models, indicators, complex technical systems, infallibility, reliability.

Выполнение задач, стоящих перед сложными техническими системами, обеспечивается как надежностью самих систем, так и безошибочностью действий обслуживающего их персонала, в связи с чем такие системы характеризуются такими терминами как «человеко-машинные системы», «антропотехнические системы», «эрготехнические системы» и более универсальным термином – «эргатические системы» [1-3]. Очевидно, что для оценки влияния безошибочности действий персонала, носящей случайный характер, на надежность эргатических систем необходимо использовать комплексный показатель, учитывающий как надежность эксплуатируемой техники, так и надежность персонала, т.е. возможность в любой момент времени и за заданное время безошибочно выполнять необходимые работы. В качестве такого комплексного показателя может быть использована следующая составляющая R_1 обобщенного показателя надежности [1]:

$$R_1 = P_{тех}(\tau)\, P_{пер}(\tau), \qquad (1)$$

где $P_{тех}(\tau)$ – вероятность нахождения техники в готовности к применению в течение времени τ; $P_{пер}(\tau)$ – вероятность безошибочной работы персонала в течение времени τ.

Влияние же безошибочности действий персонала можно проанализировать, исследуя влияние вероятности $P_{пер}(\tau)$ на показатель R_1. Простейшим нахождением вероятности $P_{пер}(\tau)$ безошибочных действий персонала за время τ эксплуатации системы является использование экспоненциального закона распределения времён совершения ошибок:

$$P_{пер}(\tau) = exp(-\lambda\tau), \qquad (2)$$

где λ – интенсивность совершения ошибок персоналом.

Данная формула может приобретать и более сложный вид как произведение вероятностей, учитывающих различные ошибки персонала:

- ошибки при выполнении каждой операции;

- невыполнение последовательности операций, указанной в документации;
- своевременность завершения каждой операции или нескольких операций.

Заметим, что по мере накопления персоналом опыта эксплуатации технических систем, совершенствования ее организации и контроля вероятность $P_{пер}(t)$ будет возрастать. Оценить же этот рост можно следующим образом. Воспользуемся основополагающими работами в теории обучаемости [4] и теории итеративного научения [5], в частности, применим кривые «научения» экспоненциального вида:

$$P_{пер} = P_{тр} - (P_{тр} - P_0)\, e^{-\gamma x}, \qquad (3)$$

где $P_{тр}$ – требуемый уровень вероятности безошибочной работы персонала;

P_0 – начальный уровень вероятности безошибочной работы персонала;

γ – скорость роста безошибочности работы персонала;

x – приведенный объем работ (мероприятий), необходимый для повышения безошибочности действий персонала.

Более подробно подходы к построению итеративных моделей научения можно посмотреть в работах [3,6].

Но вернемся к оценке влияния безошибочности действий персонала на показатель R_1, для чего потребуется построение модели, учитывающей достаточно большое количество параметров, влияющих на показатель R_1. Проведенный в работе [7] анализ возможности использования как аналитических, так и статистических моделей показал, что наиболее простым и удобным с точки зрения анализа влияния отдельных параметров на комплексный показатель надежности является аппарат теории марковских процессов с непрерывным временем.

Простейшая графовая модель эксплуатации эргатической системы представлена на *рисунке 1*. В соответствии с данным графом состояний предполагается, что эргатическая система в процессе эксплуатации может находиться в четырех возможных состояниях:

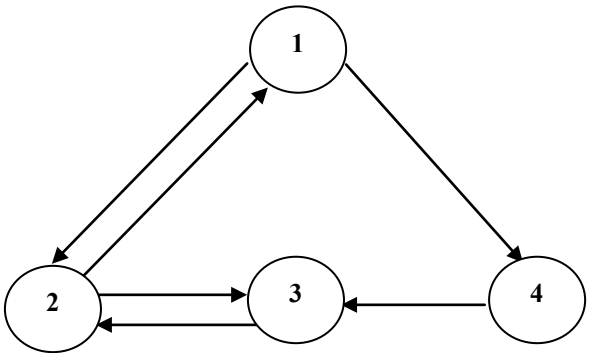


Рис. 1. Граф состояний

1 – система готова к использованию по назначению;

2 – на системе проводится плановое техническое обслуживание;

3 – система находится в состоянии скрытого отказа;

4 – на системе проводятся работы по устранению скрытых отказов и отказов, возникших по вине персонала в ходе проведения технического обслуживания.

Отметим, что переход 1-2 вызван отказами системы, а переход 2-3 – ошибками персонала.

Представленный граф описывается системой дифференциальных уравнений А.Н. Колмогорова вида

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = \sum_{j=1}^{n} a_{ij} \cdot P_i(t) + \sum_{j=1}^{n} a_{ji} \cdot P_j(t), \qquad (4)$$

а для стационарного режима – простой системой алгебраических уравнений

$$\begin{cases} -\sum_{j=1}^{n} a_{ij} \cdot P_i + \sum_{j=1}^{n} a_{ji} \cdot P_j = 0; \\ i = 1,2,\ldots,n-1; \\ \sum_{j-1}^{n} P_j = 1, \end{cases} \qquad (5)$$

где a_{ij} – интенсивность перехода из i-го в j-е состояние,

n – число возможных состояний.

Интенсивности переходов a_{ij} находятся как

$$a_{ij} = \frac{p_{ij}}{\mu_i}, \qquad (6)$$

где p_{ij} – вероятность перехода системы из i-го состояния в j-ое состояние;

μ_i – среднее время пребывания системы в i-ом состоянии.

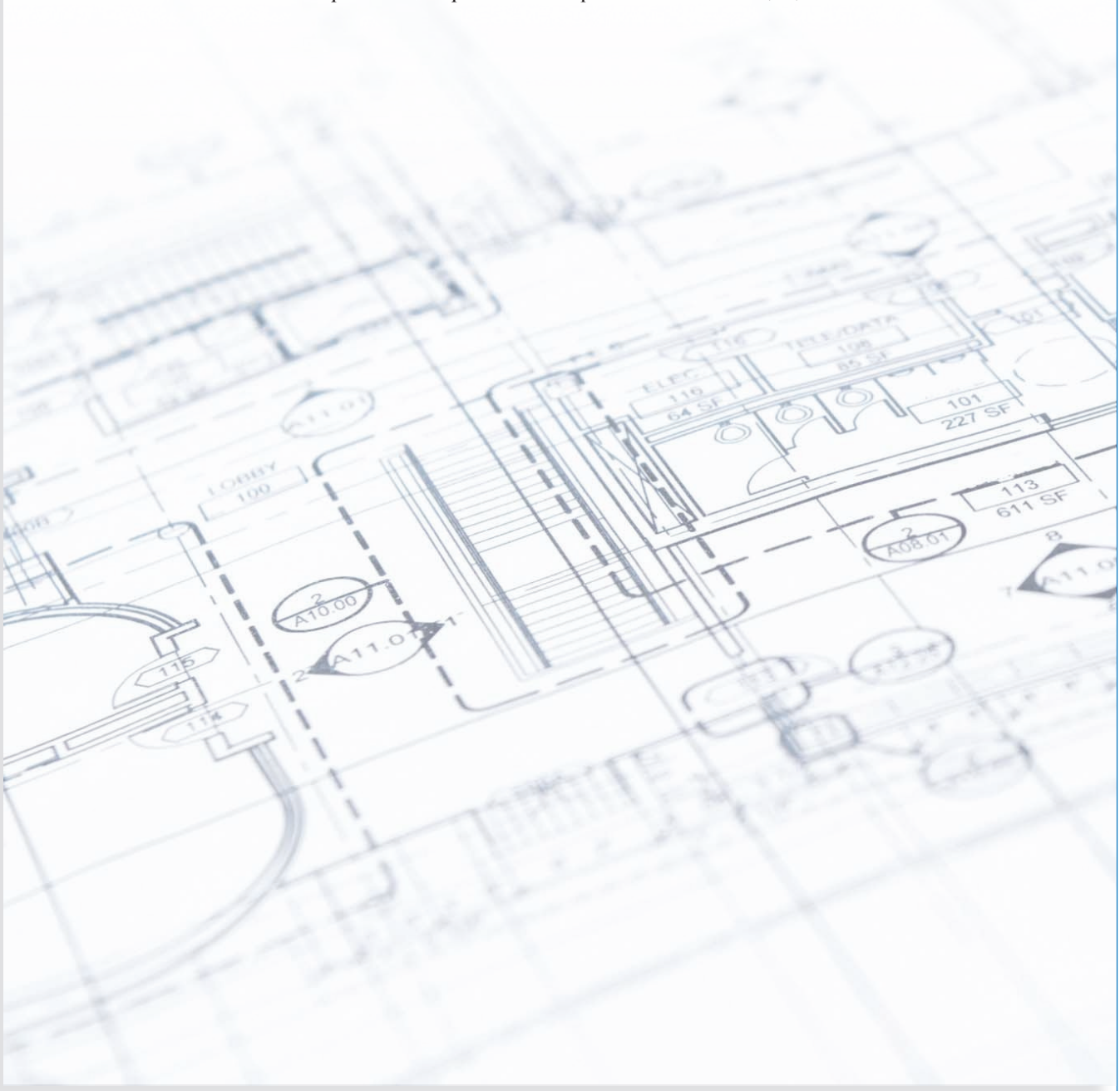
Анализ графа состояний (*рисунок 1*) и выражения (4) показывает, что ошибки персонала при выполнении работ технического обслуживания учитываются при определении интенсивностей переходов a_{21} (переход 2-1 возможен при отсутствии ошибок персонала с вероятностью p_{21}) и a_{23} (переход 2-3 возможен при совершении персоналом ошибок с вероятностью p_{23}), а также при определении среднего времени пребывания системы в состоянии 2 – μ_2. Особенности расчета вероятностей и интенсивностей переходов в марковских моделях достаточно подробно раскрыты в работах [8-9].

Проведенный анализ подходов к оценке влияния безошибочности действий персонала на надежность эргатических систем позволил выявить комплекс взаимосвязанных задач, таких, как определение интенсивностей возникновения ошибок персонала при проведении различных работ и оценок эффективности мероприятий по повышению их профессиональных компетенций,

оценки влияния как ошибок, так и обучения персонала на обеспечение готовности эргатехнических систем к использованию по назначению.

Литература

1. Фокин Ю.Г. Военная эргономика. Выпуск 1. М: МО СССР, 1976. 200 с.
2. Губинский А.А. Надежность и качество функционирования эргатических систем. Л: Наука, 1982. 270 с.
3. Волков Л.И. Безопасность ракетных и ракетно-космических комплексов. М: СИП РИА, 2002. 136 с.
4. Буш Р., Мостеллер Ф. Стохастические модели обучаемости. М: Физматгиз, 1962. 484 с.
5. Новиков Д.А. Закономерности итеративного научения. М: Институт проблем управления РАН, 1998. 77 с.
6. Володина Е.Д. Методика итеративного управления формированием в высшей школе кадрового потенциала науки // Известия Института инженерной физики, 2014. №3(33). С.93-100.
7. Емелин Н.М. Отработка систем технического обслуживания летательных аппаратов. М: Машиностроение, 1995. 128с.
8. Емелин Н.М. Марковская модель оценки безопасности эксплуатации сложных технических систем // Двойные технологии, 2021. №1(94). С.23-25.
9. Емелин Н.М. Марковские модели – простота и изящество // Известия Института инженерной физики, 2015. №2(35). С.47-51.



AUTHORS

Alatortsev Alexey I. Doctor of Technical Sciences. Head of department. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Aldebergenov Timur N. Engineer of the Telescope and Guidance System Operation Department, Quantum Optical Systems Department, military unit 85906.

Alekseev Sergei V. Graduate student. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Atakishchev Oleg I. Doctor of Technical Sciences, professor. Deputy General Director for Special Projects. Institute of Engineering Physics. Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

Berkovich Sergei B. Honorary geodesist of the Russian Federation. Doctor of Technical Sciences. Professor. Head of the Department of Navigation and Geodetic Systems. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyu l., 1a.

Bugakov Alexey I. Senior Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyu l., 1a.

Bugakov Igor A. Honoured devisor of Russia. Honorary Worker of Science and Technology of the Russian Federation. Doctor of Technical Sciences, professor. Vice-President of Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Cherepenkina Ksenia O. Engineer of the department of JSC "Corporation «MIT». Moscow, Berezovaya alley str., 10.

Danilov Vladimir. P. Candidate of Technical Sciences. Head of the Departament of the MAI Traning Center. Moscow reg., Serpukhov, st. Oktyabrskay, 21.

Drannikov Sergey G. specialist. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Egorov Vladislav V. Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Emelin Nikolay M. Honored Scientist of the RSFSR, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of FSBSE «Gosmetodcentr». Moscow, Lyusinovskaya street, 51.

Ermakov Artem M. Candidate of biological sciences. Deputy Head of the Control Department pharmaceutical quality service. Institute of Engineering Physics. Senior Researcher Institute for Theoretical and Experimental Biophysics RAS. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

Filippov Aleksandr S. Graduate student. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Furov Andrey N. Candidate of Technical Sciences. Lecturer. The Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

Gorlo Olga P. Head of the Pharmaceutical Production Center. Physician-therapist. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

Grachev Vladimir A. Honorary Worker of Higher Professional Education. Candidate of Pedagogical Sciences. Advisor to the President of the Institute. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyu l., 1a.

Kabyshev Alexander M. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial Electronics North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University). North Ossetia-Alania, Vladikavkaz, st. Nikolaeva, 44.

Kazakov Rafael R. Candidate of Technical Sciences. Associate Professor of the Department of Onboard Information and Measuring complexes of spacecraft. Military space Academy named after A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, ul. Zhdanovskaya, 13.

Khastsaev Boris D. Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Industrial Electronics North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University). North Ossetia-Alania, Vladikavkaz, st. Nikolaeva, 44.

Khmara Valery V. Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Industrial Electronics North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University). North Ossetia-Alania, Vladikavkaz, st. Nikolaeva, 44.

Klyuchkin Alexander K. Adjunct of the Department of Onboard Information and Measurement Systems of Spacecraft. Military space Academy named after A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, ul. Zhdanovskaya, 13.

Kolombet Valeriy A. Candidate of Physical and Mathematical Sciences. Head of the laboratory. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

Kotov Nikolay I. Candidate of Technical Sciences, Professor, Deputy Head of the Department of Navigation and Geodetic Systems. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Krasnova Yulia V. Candidate of Technical Sciences, Chief Technologist of Pharmaceutical Production. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyu l., 1a.

Kulakova Svetlana V. Senior Lecturer, Department of Industrial Electronics North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University). North Ossetia-Alania, Vladikavkaz, st. Nikolaeva, 44.

Kuzin Evgeny N. Candidate of Technical Sciences. Senior Researcher. Military Academy of Strategic Rocket Forces. Moscow Region, Balashikha, Karbysheva str., 8.

Kvashennikov Vladislav V. Doctor of Technical Sciences, the leading scientific employee Joint-stock company «The Kaluga scientific research institute Telemechanical devices». Kaluga, st. Karl Marx, 4.

Lesnykh Vadim N. Junior scientist. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

Luchin Andrei V. Candidate of Technical Sciences. Associate Professor. Deputy head of department. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

Lychagov Alexander S. Candidate of Technical Sciences. Lecturer in «Astronomical and geodetic support, navigation and aiming of the RK». Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

Makeev Maxim I. Researcher. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

Maslakov Maksim P. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Industrial Electronics North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University). North Ossetia-Alania, Vladikavkaz, st. Nikolaeva, 44.

Minyaev Sergey I. Candidate of Physical and Mathematical Sciences. Head of the Department of JSC "Corporation «MIT». Moscow, Berezovaya alley str., 10.

Moskvin Alexander A. Candidate of Technical Sciences. Head of Department JSC «Corporation" Kometa"». Moscow, Velozavodskaya st., 5.

AUTHORS

Nakonechny Andrey B. Graduate student. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Obynochny Igor A. Candidate of Pedagogical Sciences. Deputy head of the Faculty. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya St., 17.

Panchelyuga Victor A. Candidate of Physical and Mathematical Sciences. Senior scientist. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

Pavlov Alexandr A. Doctor of Technical Sciences, Professor. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forse. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

Pavlov Fedor A. Researcher. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

Popov Alexandr V. Adjunct. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

Present Mikhail A. Candidate of Chemical Sciences. Researcher Institute of Organic Chemistry named after N.D. Zelinsky. Moscow, Leninsky prospect, 47.

Romanenko Alexandr Y. Candidate of Technical Sciences. Applicant.

Romanenko Yuriy A. The honoured worker of a science of the Russian Federation. Doctor of Technical Sciences, Professor. Senior Researcher. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

Rudenko Edvard M. Candidate of Technical Sciences. Associate Professor of the Department of Mathematics. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya St., 17.

Rudnev Denis S. General manager JSC «Stoletika». Moscow reg., Serpukhov, Moscow highway, 42, apt. 106.

Sal'ko Andrey E. Doctor of Technical Sciences, Professor, Laureate of the prize of the government of the Russian Federation in the field of science and technology. Deputy Director General for science and technology policy and inter-structural communications. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Semikina Elena V. Lecturer. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya St., 17.

Sholokhov Aleksei V. Doctor of Technical Sciences, Professor, leading researcher of the Department of Navigation and Geodetic Systems. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Shulga Mikhail M. Graduate student. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Sinyuk Alexander D. Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of «General Professional Disciplines» Federal State-owned Military Educational Institution of Higher Professional Education «Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M.Budyonny» of the Department of Defense of the Russian Federation. St. Petersburg, Tikhoretsky Prospekt, 3.

Smirnov Dmitriy V. Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, associate professor. Full member of the Academy of Engineering Sciences. Professor of the Department FSBEI of HE MAI (NRU). First Vice President of the Institute – Deputy Chairman of the Board of the Institute of Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Smurov Sergey V. Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, professor. First Vice President of the Institute – Chief Designer. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Strelchuk Alexander S. Postgraduate student. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Tarasov Alexander A. Postgraduate student of the Department of «General Professional Disciplines» Federal State-owned Military Educational Institution of Higher Professional Education «Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M.Budyonny» of the Ministry of Defense of the Russian Federation. St. Petersburg, K-64, Tikhoretsky Prospekt, 3.

Tzar'kov Alexey N. Honoured scientist of Russia, Doctor of Technical Sciences, professor. President of Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Tsimbal Vladimir A. The honored worker of a science of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, professor. Professor. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

Umnikov Evgeny V. Leading engineer. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Usik Boris A. Candidate of Technical Sciences, associate professor. Associate Professor of the Department. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

Volkov Gennadiy G. Doctor of physical and mathematical sciences, professor. Senior Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

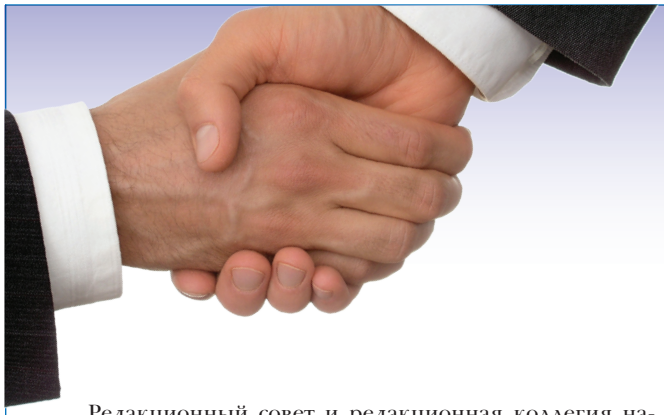
Volsky Vladimir S. Candidate of Chemical Sciences. Leading Researcher Department of Biomedical Research pharmaceutical manufacturing center. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Zagarskih Vladimir I. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. Senior Researcher. VA SRF behalf of Peter the Great. Moscow reg., Balashikha, st. Karbysheva, d. 8.

Zakharov Vladimir L. Doctor of Military Sciences, professor. Full member of the Academy of Military Sciences. Professor. FSBEI of HE MAI (NRU). Moscow, Volokolamsk Highway, 4.

Zelenevsky Vladimir V. Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation Doctor of Technical Sciences, Professor, professor of the department. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forse. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

Zelenevsky Yury V. Doctor of Technical Sciences, associate professor. Researcher. Military Academy of the Strategic Missile Forse. Moscow Reg., Balashikha, Karbysheva st., 8.



ЭТИКА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

Редакционный совет и редакционная коллегия научно-технического журнала «Известия Института инженерной физики» придерживаются принятых международным сообществом принципов публикационной этики, отраженных, в частности, в рекомендациях Комитета по этике научных публикаций (Committee on Publication Ethics).

Все статьи, предоставленные для публикации в журнале «Известия Института инженерной физики», проходят рецензирование на оригинальность, этичность и значимость. Соблюдение стандартов этического поведения важно для всех сторон, принимающих участие в публикации: авторов, редакторов журнала, рецензентов, издателя.

ОБЯЗАННОСТИ РЕДАКТОРА

Редактор в своей деятельности обязуется:

- постоянно совершенствовать журнал;
- следовать принципу свободы мнений;
- стремиться к удовлетворению потребностей читателей и авторов журнала;
- исключать влияние интересов бизнеса или политики на принятие решений об опубликовании материалов;
- принимать решения на основании принципа справедливости и беспристрастности, обеспечивать прозрачность редакционной деятельности на всех ее этапах;
- не раскрывать информацию о предоставленных материалах никому, кроме соответствующих авторов, рецензентов, других редакционных консультантов;
- оценивать рукописи исключительно по их научному содержанию;
- принимать решение о публикации материалов, руководствуясь следующими главными критериями: соответствие рукописи тематике журнала; актуальность, новизна и научная значимость представленной статьи; ясность изложения; достоверность результатов и законченность выводов. Качество исследования и его актуальность являются основой для решения о публикации;
- принимать меры для обеспечения высокого качества публикуемых материалов и защиты конфиденциальности персональной информации. При обнаружении содержательных, грамматических, стилистических и иных ошибок редакция обязуется предпринимать все меры для их устранения;
- обосновать свое решение в случае принятия или отклонения статьи;
- предоставить автору рецензируемого материала возможность для обоснования своей исследовательской позиции;
- поощрять дискуссии и предоставлять возможность для изложения точки зрения оппонентов;
- не использовать в собственных исследованиях информацию из неопубликованных материалов.

ОБЯЗАННОСТИ ЧЛЕНОВ РЕДСОВЕТА (РЕДКОЛЛЕГИИ)

Решение о публикации.

Редсовет (редколлегия) журнала «Известия Института инженерной физики» являются ответственными за принятие решения о том, какие статьи будут опубликованы в журнале. Решение принимается на основании представляемых на статью рецензий

Редсовет (редколлегия) придерживаются политики журнала и действуют в рамках законных требований, поскольку несут ответственность за нарушение авторских прав.

Конфиденциальность.

Рецензенты или кто-либо из сотрудников редакции не должны разглашать никакую информацию о предоставленной рукописи кому-либо, кроме самого автора, рецензентов, потенциальных рецензентов, членов редакционного совета (коллегии) и издателя, поскольку она является конфиденциальной.

Раскрытие информации и конфликт интересов.

Неопубликованные материалы, находящиеся в предоставленной статье, не должны быть использованы в собственном исследовании научного редактора и рецензентов без специального письменного разрешения автора.

ОБЯЗАННОСТИ РЕЦЕНЗЕНТОВ

Рецензенты оказывают помощь членам редакционного совета (редколлегии) при принятии редакционного решения, а также помогают автору усовершенствовать работу.

Конфиденциальность.

Любые рукописи, полученные для рецензирования, должны восприниматься как конфиденциальные документы. Они не могут быть показаны либо обговорены с другими лицами, кроме тех, которые уполномочены редакцией.

Подтверждение источников.

Рецензенты должны идентифицировать опубликованную работу, которая не была процитирована автором. Любое утверждение, что наблюдение, происхождение либо аргумент ранее были сообщены, необходимо сопровождать соответствующей ссылкой. Рецензент должен также донести до сведения редакции о любой существенной схожести или частичном совпадении между рукописью, которая рецензируется, и другой уже опубликованной работой, которая ему знакома.

Раскрытие информации и конфликт интересов.

Приватная информация или идеи, возникшие в процессе рецензирования, должны остаться конфиденциальными и не могут быть использованы в личных интересах. Рецензент не должен рассматривать рукопись, если имеет место конфликт интересов в результате его конкурентных, партнерских либо других отношений или связей с кем-либо из авторов, компаний или организаций, связанных с материалом публикации.

ОБЯЗАННОСТИ АВТОРОВ

Оригинальность и плагиат.

Авторы должны гарантировать, что они написали полностью оригинальную работу. Если авторы использовали работу и/или слова других авторов, это должно быть соответственно указано и процитировано.

Доступ к данным и сохранность.

Автор должен быть готов обеспечить доступ к данным, связанными с материалом публикации, если таковой возможен. Во всяком случае, автор должен быть готов сохранять такие данные на протяжении разумного периода времени после опубликования.

Многоразовая, избыточная или конкурирующая публикация.

Автор не должен публиковать работы, которые описывают по сути одно и то же исследование, более чем один раз или более чем в одном журнале.

Предоставление рукописи более чем в один журнал одновременно означает неэтичное издательское поведение и является недопустимым.

Подтверждение источников.

Необходимо предоставлять должное подтверждение работ других авторов. Авторы должны процитировать публикации, которые имели значение при создании заявленной работы.

Авторство материала.

Авторство необходимо ограничить теми лицами, которые внесли ощутимый вклад в концепцию, проект, исполнение или интерпретацию заявленной работы. Всех, кто внес ощутимый вклад, следует внести в список соавторов.

Автор должен гарантировать, что список авторов содержит только действительных авторов и в него не внесены те, кто не имеет отношения к данной работе, а также то, что все соавторы ознакомились и одобрили окончательную версию статьи и дали согласие на ее публикацию.

Раскрытие информации и конфликт интересов.

Все авторы должны сообщать, если в их работе имеется финансовый либо другой конфликт интересов, который может повлиять на результаты или интерпретацию их рукописи.

Ошибки в опубликованных работах.

Если автор обнаружит существенную ошибку или неточность в своей опубликованной работе, его обязанность – незамедлительно сообщить об этом в редакцию журнала или издателю и сотрудничать с редакцией при исправлении ошибок.

НАРУШЕНИЯ

При возникновении ситуации, связанной с нарушением публикационной этики со стороны редактора, автора или рецензента, требуется ее обязательное рассмотрение. Редакционный совет (редколлегия) обязана потребовать разъяснения, без привлечения лиц, которые могут иметь конфликт интересов с одной из сторон.

Если материал, содержащий значительные неточности, был опубликован, он должен быть незамедлительно исправлен в форме, доступной для читателей и систем индексирования.

ТРЕБОВАНИЯ К АВТОРАМ СТАТЕЙ

Для публикации принимаются статьи на русском языке. Рекомендуемый объем статьи – 0,2–0,4 п.л. (8000–16000 знаков).

Тексты должны быть представлены:

- в электронном виде (Word 2003). Иллюстративный материал (сложные формулы, рисунки, фотографии и т.д.) кроме размещения в тексте обязательно должны предоставляться отдельными файлами!
- на бумажном носителе формата А4.

Текст статьи должен быть набран через 1,5 интервала (гарнитура «Times New Roman»), кегль 14.

Простые символы и формулы не набирать в математическом редакторе!

Напечатанный текст должен иметь поля: верхнее и левое – 2,5 см, правое и нижнее – 2 см.

Вверху первой страницы статьи размещаются:

- рубрика журнала (см. *Приложение 1*);
- УДК;
- название статьи с переводом на английский язык;
- имя, отчество, фамилия автора (авторов), ученая степень, ученое звание, должность и место работы.

Список литературы (**Литература**) размещается в конце статьи.

После литературы помещаются:

- список ключевых слов, краткая аннотация (на русском и английском языках).

Завершает рукопись полная информация об авторе (авторах):

- ФИО;
- ученая степень, ученое звание, должность и место работы с переводом на английский язык;
- адрес места работы, контактные телефоны, электронный адрес (по желанию автора – домашний адрес и телефон).

Обращаем особое внимание на:

- точность и правильность библиографического оформления списка литературы (в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008);
- выверенность статьи в компьютерном наборе;
- полное соответствие файла на электронном носителе и бумажного варианта.

Редакционная коллегия оставляет за собой право на редактирование статей, при этом с точки зрения научного содержания авторский вариант сохраняется.

Статьи, не принятые к публикации, не возвращаются.

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается!

Приложение 1

РУБРИКАЦИЯ ЖУРНАЛА «Известия Института инженерной физики»

Постоянные рубрики

- **Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы.**
- **Радиотехника и связь.**
- **Информатика, вычислительная техника и управление.**

Разовые рубрики

- **Техника специального назначения.**
- **Инновационные проекты.**
- **Техническое регулирование.**
- **Профессиональное образование.**
- **Искусственный интеллект и робототехника.**
- **Медицина и фармацевтика.**
- **Диагностические системы.**
- **Научные обзоры. Научные рецензии. Отзывы.**

В соответствии с Решением Межведомственной комиссии РФ по защите государственной тайны №69 от 26 февраля 2001 г., требованиями законов №5485-1 «О государственной тайне» от 21 июля 1993 г., №149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и защите информации» от 27 июля 2006 г. статьи для публикации принимаются только при наличии экспертного заключения с разрешением на открытое опубликование.

INTERREGIONAL PUBLIC INSTITUTION
"INSTITUTE OF ENGINEERING PHYSICS"
(SCIENTIFIC, EDUCATIONAL AND INDUSTRIAL INSTITUTION)

CONTENTS

INSTRUMENT MAKING, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES AND SYSTEMS

Minyaev S.I., Cherepenkina K.O.
Global numerical search for «hard» and «hot» points of the Earths atmosphere 2

Alatortsev A.I., Furov A.N., Nischakov I.S.
Assessment of the possibilities of interception of bodies of natural origin in the dense layers of the atmosphere 6

Smurov S.V., Sal'ko A.E., Zagarskih V.I., Kuzin E.N.
Graph-analytical evaluation of the critical conditions of excitation of detonation in a charge of explosive material enclosed in a shell when the last is cut with the help of an elongated shaped charge 9

Berkovich S.B., Kotov N.I., Sholokhov A.V
Synthesis of simulation models of transformants of the anomalous gravitational field of the Earth, taking into account the condition of its potentiality 14

Kolombet V.A., Panchelyuga V.A., Lesnykh V.N.
«Quaternion bifurcation» as a way to a mathematical description of the splitting of matter into massive particles and massless fields 20

Usik B.A., Luchin A.V., Obynochny I.A.
Improving the efficiency of parallel operation of diesel generators under variable load conditions 23

Zakharov V.L., Smirnov D.V., Kazakov R.R., Aldebergenov T.N.
Software package for determining the parameters of stars by optoelectronic devices of space vehicles 27

RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATION

Zelenevsky V.V., Zelenevsky Y.V., Popov A.V., Egorov V.V., Nakonechny A.B.
Evaluation of energy and statistical characteristics of meter-range radio channels with low-raised antennas 31

Sinyuk A.D., Tarasov A.A.
Information basic sets of open network multi-key agreement 36

Kvashennikov V.V.
Construction system orthogonal checks for correction of erasures outside minimum code distance 43

Moskvin A.A., Danilov V.P.
Features of modeling information exchange in the basic segment of a hierarchical network with different quality of data transmission channels 48

Tsimbal V.A., Strelchuk A.S.
Development of a methodology for reconfiguration of technical means of the ISPC of ACS SP to ensure the stability of their operation under the influence of destabilizing factors 54

INFORMATION SCIENCE, COMPUTING AND MANAGEMENT

Smurov S.V., Volkov G.G.
On irreducible representations complex and real non-Abelian lie algebras 62

Kabyshev A.M., Khmara V.V., Maslakov M.P., Khastsaev B.D., Kulakova S.V.
Signals and algorithms for controlling devices of the pneumatic transportation system 69

Pavlov A.A., Romanenko Y.A., Makeev M.I., Pavlov F.A., Romanenko A.Y.
Information protection method 77

Berkovich S.B., Sholokhov A.V., Lychagov A.S.
Potentially achievable accuracy of azimuth assessment in the integrated terrain navigation system aided by digital road map and technical vision 81

Bugakov I.A., Bugakov A.I., Filippov A.S., Alekseev S.V., Shulga M.M.
Detection of electronic bookmarks using a radio channel for receiving and transmitting information 85

Zakharov V.L., Smirnov D.V., Klyuchkin A.K.
The method of selection of orbital objects according to the results of processing inhomogeneous measuring information 90

Rudenko E.M., Semikina E.V.
A method for constructing a vector objective function for calculation of routes on graphs by a genetic algorithm 93

Umnikov E.V., Atakishchev O.I., Grachev V.A.
Application of the Saati hierarchy analysis method to evaluate the effectiveness of the virtual training space information protection system 99

MODERN MEDICINE AND PHARMACEUTICS

Ermakov A.M., Gorlo O.P., Krasnova Y.V., Volsky V.S., Present M.A., Tsar'kov A.N., Rudnev D.S.
On approaches to obtaining high-purity sodium salt of luminol (3-aminophthalhydrazide sodium, 5-amino-2,3-dihydro-1,4-phthalazinedione sodium) – the basis for drug Tameron 104

PROFESSIONAL EDUCATION

Drannikov S.G.
Methodology for assessing cadets satisfaction with the system of training specialists in a military university 106

SCIENTIFIC REVIEWS. SCIENTIFIC CRITIQUES. COMMENTS

Emelin N.M.
The approaches to assessing the impact of error-free personnel performance to the reliability of the complex technical systems 112

AUTHORS 115
THE ETHICS OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS 117
REQUIREMENTS TO AUTHORS 118

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

Подписной индекс: 59190
по каталогу «Урал-Пресс»

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

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия. Свидетельство о регистрации СМИ ПИ №ФС77-26650 от 20 декабря 2006 г.
Отпечатано на полиграфической базе МОУ «ИИФ».
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а.
Подписано в печать 01.02.2022.
Дата выхода в свет 08.02.2022. Тираж 2000 экз. Цена свободная.
© Межрегиональное общественное учреждение «Институт инженерной физики» (ИИФ), 2022.

Межрегиональное
общественное
учреждение

«Институт инженерной физики»

(МОУ «ИИФ»)

научное, образовательное
и производственное
учреждение

142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный переулок, д. 1а
http://www.iifrf.ru e-mail:info@iifmail.ru
Тел.: +7(4967) 35-31-93, 35-13-71 факс: +7(4967) 35-44-20 моб.: +7 (499) 400-05-75