

№ 2⁺⁰
2019 [52]

ИЗВЕСТИЯ

научно-технический журнал

ИНСТИТУТА ИНЖЕНЕРНОЙ ФИЗИКИ



27 АПРЕЛЯ

день основания

Института инженерной физики





ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

- 2 Зыкин С.И., Анцибор С.В., Ивахно Н.В.**
Математическая модель выбора начального сопротивления в дыхательном контуре на основании данных диагностической матрицы состояний
- 7 Смирнов В.А., Шеламов С.В.**
Анализ погрешностей схем аналого-цифровой обработки сигналов синусно-косинусного вращающегося трансформатора
- 11 Колчин А.В., Ионкина Е.Г., Безродный Б.Ф.**
О некоторых аспектах регистрации и обработки слабых электрических сигналов
- 14 Казаков Р.Р., Захаров В.Л., Смирнов Д.В.**
Современное состояние и перспективы развития оптико-электронных средств космических аппаратов
- 19 Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В.**
О возникающей перспективе переопределения длительности секунды и длины метра
- 22 Коннов С.А.**
Математическая модель диагностирования объекта электроэнергетического оборудования с классификацией технического состояния в нечеткой логической системе

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

- 26 Шевченко В.А.**
Верхняя аддитивная граница вероятности ошибки в канале связи с памятью при использовании кодирования и псевдослучайного перемежения
- 32 Квашенников В.В.**
Многомерные каскадные коды и алгоритмы итеративного декодирования
- 36 Светилов М.А.**
Методика оценки оперативности доведения сообщений в транспортной сети телекоммуникационной подсистемы АСУ общего назначения

- 39 Зеленевский В.В., Шмырин Е.В., Кургузов В.В.**

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

- 43 Надеждин Е.Н., Шаранов Д.А., Шабалин О.В., Игнатенко И.А.**
К проблеме обеспечения конкурентоспособности программных продуктов отечественного производства
- 48 Иващенко О.Ю.**
Оперативная оптимизация временных параметров мероприятий РХБ-защиты специальных объектов

- 53 Каракашев А.В., Гусева А.С.**
Алгоритм повышения помехоустойчивости внедрения аутентификационных меток на основе сигналов с расширенным спектром

- 56 Каракашев А.В., Грибунин В.Г., Шеламов С.В.**
Сравнение криптографических и стеганографических методов имитозащиты мультимедийной информации при передаче по радиоканалу в условиях преднамеренных помех

- 60 Гнедин Р.В., Грибунин В.Г.**
Особенности обеспечения доверия в гетерогенной информационной системе

- 64 Стародубцев П.Е., Бухаров Е.О., Кудря Р.А., Смирнов Я.Д.**
Определение основных возможностей нарушителя безопасности информационных систем путем включения в топологию сети ложных сетевых информационных объектов

- 71 Антохин Е.А., Атакищев О.И., Панасенко Н.Н., Чернова П.Д.**
Обеспечение безопасности испытаний беспилотных летательных аппаратов военного и специального назначения

- 77 Захаров В.Л., Смирнов Д.В., Шаймарданов А.М.**
Математические модели систем автоматического управления с широтно-импульсной модуляцией

- 84 Захаров В.Л., Смирнов Д.В., Казаков Р.Р., Коробков А.А.**
Методика определения области разброса начальных параметров движения отделяющихся частей с учетом оперативных данных о состоянии атмосферы в районах падения

- 89 Смирнов Д.В., Коротин А.М.**
Определение в рамках методики построения систем контроля целостности ответственной информации в системах АЛС на базе широкополосного радиоканала процедуры обновления параметров безопасности

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И РОБОТОТЕХНИКА

- 93 Бугаков И.А., Царьков А.Н.**
О «настоящем» искусственном интеллекте для освоения Арктики

НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ • НАУЧНЫЕ РЕЦЕНЗИИ • ОТЗЫВЫ

- 101 Емелин Н.М.**
Как повысить эффективность контроля качества Перечня рецензируемых изданий

- 103 Волков Г.Г., Масликов А.А., Смуров С.В., Царьков А.Н.**
О многокубитных схемах запутывания и телепортации на основе NV-центров в алмазе

106 СОБЫТИЯ

107 AUTHORS

109 ЭТИКА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

110 ТРЕБОВАНИЯ К АВТОРАМ СТАТЕЙ

Научно-технический журнал

ИЗВЕСТИЯ Института инженерной физики №2 (52) 2019

Издается с апреля 2006 г. Выходит ежеквартально

ISSN 2073-8110

Включен в «Перечень ВАК»
по научным специальностям:

05.11.16. Информационно-измерительные
и управляющие системы

05.12.13. Системы, сети и устройства телекоммуникаций
05.13.01. Системный анализ, управление
и обработка информации

05.13.19. 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 ЦНИИ МО РФ»
заслуженный деятель науки РФ, заслуженный
изобретатель РФ, лауреат Государственной
премии РФ, лауреат премии Правительства РФ,
доктор технических наук, профессор

Сергей Владимирович Дворянkin

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

Редакционная коллегия

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

Борис Фёдорович Безродный
доктор технических наук, профессор

Сергей Борисович Беркович
почетный геодезист РФ
доктор технических наук, профессор

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

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

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

Сергей Григорьевич Данилюк
доктор технических наук, профессор

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

Николай Николаевич Казаков
член Союза писателей России
выпускающий редактор

Олег Павлович Кузнецов
кандидат технических наук, доцент

Александр Ильич Куприянов
доктор технических наук, профессор

Анатолий Викторович Мазин
доктор технических наук, доцент

Алексей Сергеевич Марков
доктор технических наук,
старший научный сотрудник

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

Роман Леонидович Мусатов
кандидат технических наук
заместитель главного редактора

Игорь Николаевич Оков
доктор технических наук, профессор

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

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

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

Валерий Николаевич Умников
доктор технических наук, профессор

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

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



Анна Анатольевна Балакина

Главный бухгалтер –
Советник Президента
Института инженерной физики
по финансам
заслуженный экономист
Московской области

Уважаемые друзья, коллеги!

Примите искренние поздравления с Днем рождения нашего Института – Института, в котором мы все успешно работаем, в который с радостью приходим каждое утро, где по-доброму общаемся со своими коллегами, решаем совместные задачи, радуемся достигнутым результатам, сплачиваемся для преодоления трудностей!

Институту – 26 лет. Много это или мало? Для человека – это возраст молодости. Он уже получил образование в выбранной профессии, приобрел некоторый опыт, возможно, женился (если это мужчина, как наш Институт), стал папой.

А как же наш «мужчина» – наш Институт? МОУ «ИИФ» – зрелая, уважаемая организация, в которой трудятся 845 человек: 26 докторов наук, 98 кандидата наук, 24 профессора и 84 доцента, 11 заслуженных деятелей РФ, 19 почетных работников РФ, 1 лауреат Государственной премии СССР.

Институт представляет собой научно-исследовательскую организацию, основным подразделением которого является научно-технический центр, состоящий из 10 научно-исследовательских управлений (в состав которых входит 24 НИО, 8 научно-исследовательских и испытательных лабораторий) и 3 бюро. Институт имеет лицензии, аттестаты, сертификаты и свидетельства на выполнение основных видов деятельности и для выполнения НИОКР по государственному оборонному заказам. Только лицензий на сегодняшний день у нас 28!

Кроме основного вида деятельности – «Научные исследования и разработки в области естественных и технических наук» – Институт представляет услуги по следующим направлениям: телекоммуникационные; услуги по монтажу и техническому обслуживанию прочего электрооборудования; услуги по организации образовательной деятельности; издательская деятельность; производство и многие другие.

Так что с полным основанием можно сделать вывод, что к 26 годам наш Институт представляет собой достойного серьезного «мужчину», получившего хорошее образование, защитившего две диссертации – кандидатскую и докторскую, имеющего положительную репутацию среди заказчиков и партнеров, большое количество изобретений, наград и благодарностей за свою деятельность.

Мы гордимся нашим Институтом! С ним можно дружить, ему можно доверять, ему можно поручить любое дело и быть уверенным, что он не подведет и сделает все качественно и в срок!

От себя лично и от лица своего отдела – бухгалтерии хочу искренне поздравить наш любимый Институт и пожелать ему развиваться, делать открытия, воплощать их в жизнь!

Пусть будет много работы, много заказов и интересных решений!

Годы идут, и с ними взрослеет наш Институт! Мы хотим быть всегда рядом, хотим жить вместе с тобой интересной жизнью, увлекательной и всегда новой!

Мы счастливы, что ты есть, счастливы работать и быть полезными тебе!

С Днем рождения, наш любимый Институт!

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 681.2-5, 681.518.3

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ
МОДЕЛЬ ВЫБОРА
НАЧАЛЬНОГО
СОПРОТИВЛЕНИЯ В
ДЫХАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ
НА ОСНОВАНИИ ДАННЫХ
ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ
МАТРИЦЫ СОСТОЯНИЙ**

**MATHEMATICAL MODEL
OF SELECTION OF INITIAL
RESISTANCE IN THE
RESPIRATORY CIRCUIT ON
THE BASIS OF DIAGNOSTIC
MATRIX STATUS DATA**

Сергей Игоревич Зыкин
аспирант кафедры «Приборы и
биотехнические системы»
ФГБОУ ВО «Тульский
государственный университет»
Адрес: 300012, г. Тула,
проспект Ленина, д. 92
Тел.: 8(4872) 35-05-52
E-mail: sergius.klasis@gmail.com

Сергей Валентинович Анцибор
аспирант кафедры «Приборы и
биотехнические системы»
ФГБОУ ВО «Тульский
государственный университет»
Адрес: 300012, г. Тула,
проспект Ленина, д. 92
Тел.: 8(4872) 35-05-52
E-mail: tulaokb@yandex.ru

Наталья Валериевна Ивахно
доктор технических наук, доцент
профессор кафедры «Приборы
и биотехнические системы»
ФГБОУ ВО «Тульский
государственный университет»
Адрес: 300012, г. Тула,
проспект Ленина, д. 92
Тел.: 8(4872) 35-05-52
E-mail: natalia_iv@list.ru

Аннотация

В статье рассмотрена математическая модель и алгоритм выбора начального сопротивления в дыхательном контуре человека при проведении корректирующих воздействий. Используя данные диагностической матрицы состояний, производится учет индивидуального состояния человека.

Ключевые слова: матрица состояний, диагностирование, начальное сопротивление, дыхательный контур.

Summary

The mathematical model and algorithm considers the choice of the initial resistance in the human respiratory contour in the course of corrective actions. Using the data of the diagnostic matrix of states, the individuals state of the person is taken into account.

Keywords: state matrix, diagnosis, initial resistance, respiratory circuit.

При проектировании адаптивных комплексов корректирующего воздействия на дыхательную систему человека [1] важной задачей является начальный выбор значения сопротивления в качестве задаваемой нагрузки. Так, реакция здорового испытуемого с тренированной дыхательной системой на увеличение сопротивления в дыхательном контуре отражается изменением показателей диагностической матрицы состояний,

методика построения которой описана в [2, 3]. При этом параметры этой матрицы угол наклона аппроксимирующей функции α при повышении давления, время нарастания кривой давления до максимума t_r , длительность фазы вдоха/выдоха дыхания T_i линейно увеличиваются. На *рисунке 1* представлены два графика изменения параметра α тренированного испытуемого и испытуемого с малой реакцией на увеличение сопротивления.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Расчет средних значений изменений параметров диагностической матрицы между разными уровнями сопротивления [3] описывается формулами:

$$k_0 = \sum_{i=0}^N \frac{(\alpha_i - \alpha_{i-1})^2}{\alpha_0^2}, k_1 = \sum_{i=0}^N \frac{(\beta_i - \beta_{i-1})^2}{\beta_0^2},$$

$$k_2 = \sum_{i=0}^3 \frac{(M_{i2} - M_{i*2})^2}{M_{02}^2}, k_3 = \sum_{i=0}^3 \frac{(M_{i3} - M_{i*3})^2}{M_{03}^2}.$$

где β_i – угол наклона аппроксимирующей кривой при уменьшении давления;

i – заданные уровни сопротивления в дыхательном контуре;

k_0 – коэффициент реакции человека по показателю α ;

k_1 – коэффициент реакции человека по показателю β ;

k_2 – коэффициент реакции человека по показателю t ;

k_3 – коэффициент реакции человека по показателю T .

С использованием эталонной диагностической матрицы получаем [3]:

$$k_0 = \sum_{i=0}^3 \frac{(M_{i0} - M_{i*0})^2}{M_{00}^2}, k_1 = \sum_{i=0}^3 \frac{(M_{i1} - M_{i*1})^2}{M_{01}^2},$$

$$k_2 = \sum_{i=0}^3 \frac{(M_{i2} - M_{i*2})^2}{M_{02}^2}, k_3 = \sum_{i=0}^3 \frac{(M_{i3} - M_{i*3})^2}{M_{03}^2}.$$

Обобщенная формула:

$$k_m = \sum_{i=0}^3 \frac{(M_{im} - M_{i*m})^2}{M_{0m}^2},$$

где $i^* = i - 1$, соответствия различным уровням нагрузки на дыхательную систему, включающим в себя дыхание без нагрузки, перекрытие дыхательного контура на 20%, 40%, 60%, 80%;

m меняется от 0 до 3, соответствия коэффициентам реакции человека по различным показателям.

Коэффициенты k_m могут быть вычислены при условии равного увеличения сопротивления в дыхательном контуре [1,2] – перекрытие площади дыхательного контура на 0%, 20%, 40%, 60%, 80%. Таким образом, вид диагностической матрицы состояний:

$$M_{ij} = \begin{bmatrix} M_{00} & M_{01} & M_{02} & M_{03} \\ M_{10} & M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{20} & M_{21} & M_{13} & M_{23} \\ M_{30} & M_{31} & M_{14} & M_{33} \\ M_{40} & M_{41} & M_{15} & M_{43} \end{bmatrix},$$

где $j=0, \dots, 3$ номер параметра дыхательной системы человека;

$i=0, \dots, 4$ уровень нагрузки;

M_{i0} – угол наклона аппроксимирующей функции α ;

M_{i1} – угол наклона аппроксимирующей функции β ;

M_{i2} – времени нарастания кривой давления до максимума;

M_{i3} – длительности фазы вдоха/выдоха дыхания;

M_{0j} – показатели, полученные при свободном дыхании в контуре;

M_{1j} – показатели, полученные при сопротивлении 0,2R в контуре;

M_{2j} – показатели, полученные при сопротивлении 0,4R в контуре;

M_{3j} – показатели, полученные при сопротивлении 0,6R в контуре;

M_{4j} – показатели, полученные при сопротивлении 0,8R в контуре.

Если измеряемая матрица пациента не соответствует по уровням нагрузки матрице M_{ij} , следует, зная промежуточные значения и проводя интерполяцию, вычислить предполагаемые показатели на эталонных уровнях нагрузки [4,5] по формулам:

$$\alpha = \alpha_0 + k_\alpha * R_i, \quad \beta = \beta_0 + k_\beta * R_i, \quad t = t_0 + k_t * R_i,$$

$$T = T_0 + k_T * R_i.$$

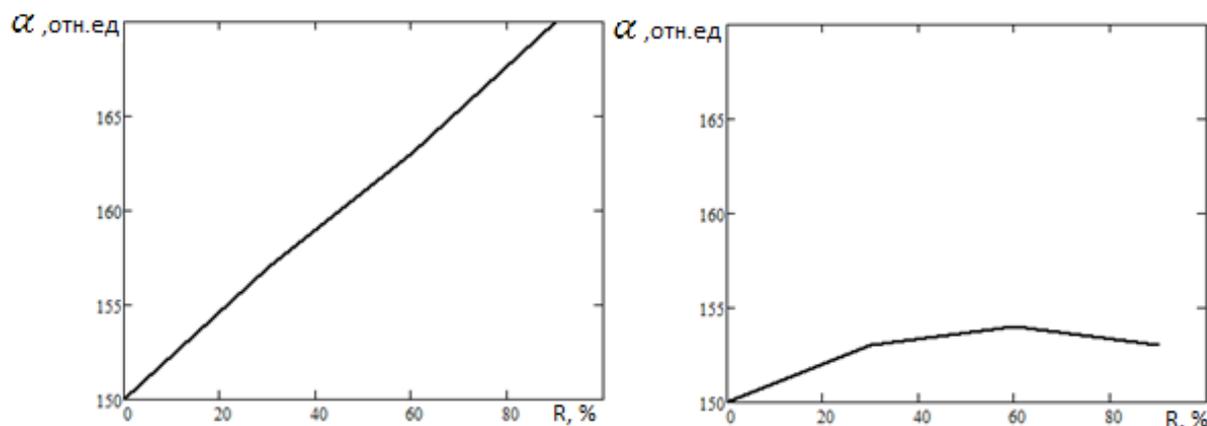


Рис. 1. Тренированный испытуемый и испытуемый с малой реакцией на сопротивление

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

С использованием переменных эталонной матрицы:

$$M_{i0} = M_{00} + k_{\alpha} * R_i, \quad M_{i1} = M_{01} + k_{\beta} * R_i,$$

$$M_{i2} = M_{02} + k_t * R_i, \quad M_{i3} = M_{03} + k_T * R_i.$$

Обобщенная формула:

$$M_{in} = M_{0n} + k_n * R_i,$$

где n соответствует номеру параметра.

Общий коэффициент реакции испытуемого на изменение сопротивления в контуре считается по формуле:

$$K_{общ} = b * k_0 + b * k_1 + b * k_2 + b * k_3,$$

где b - коэффициент значимости параметров, равный 0,25.

Общий коэффициент реакции человека отражает ответ дыхательной системы испытуемого на различные уровни сопротивления в дыхательном контуре, зная который можно прогнозировать необходимую нагрузку для каждого испытуемого индивидуально.

Посчитаем показатели общего коэффициента реакции испытуемого с нормальной реакцией на изменение сопротивления в дыхательном контуре (испытуемый 1):

$$M = \begin{bmatrix} 0,15 & 0,02 & 0,3 & 1 \\ 0,154 & 0,02 & 0,43 & 1,2 \\ 0,160 & 0,02 & 0,58 & 1,5 \\ 0,166 & 0,021 & 0,72 & 1,8 \\ 0,171 & 0,021 & 0,8 & 2 \end{bmatrix},$$

$$k_0 = \sum_{i=0}^3 \frac{(M_{i0} - M_{i*0})^2}{M_{00}^2} = 1,256 * 10^{-3}, \quad k_1 = \sum_{i=0}^3 \frac{(M_{i1} - M_{i*1})^2}{M_{01}^2} = 0,$$

$$k_2 = \sum_{i=0}^3 \frac{(M_{i2} - M_{i*2})^2}{M_{02}^2} = 0,727, \quad k_3 = \sum_{i=0}^3 \frac{(M_{i3} - M_{i*3})^2}{M_{03}^2} = 2,889,$$

$$K_{общ} = 0,9.$$

Посчитаем показатели общего коэффициента реакции испытуемого с малой реакцией на изменение сопротивления в дыхательном контуре (испытуемый 2):

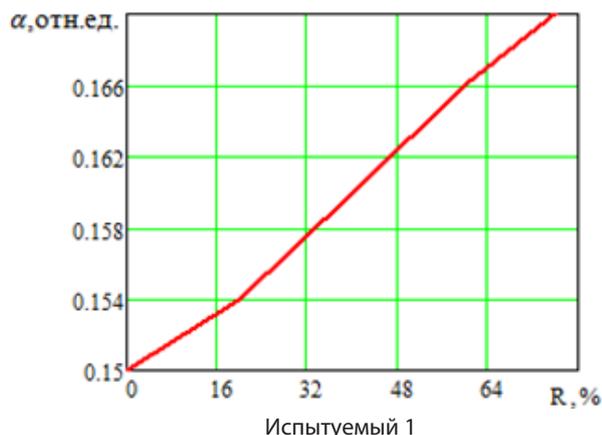


Рис. 2. Зависимость угла наклона аппроксимирующей кривой α от сопротивления

$$M = \begin{bmatrix} 0,15 & 0,02 & 0,3 & 1 \\ 0,152 & 0,02 & 0,35 & 1,2 \\ 0,155 & 0,02 & 0,40 & 1,3 \\ 0,157 & 0,021 & 0,45 & 1,4 \\ 0,16 & 0,021 & 0,5 & 1,5 \end{bmatrix},$$

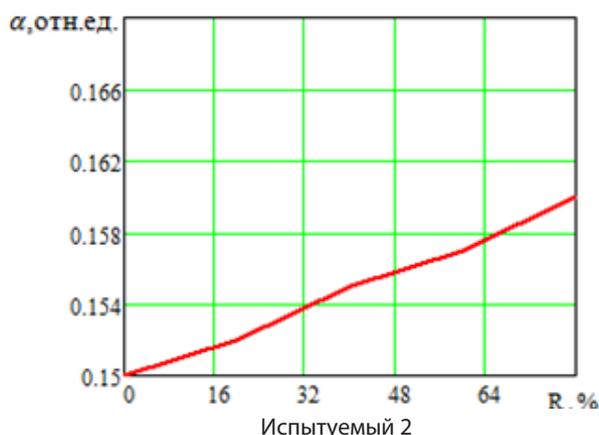
$$k_0 = \sum_{i=0}^3 \frac{(M_{i0} - M_{i*0})^2}{M_{00}^2} = 2,889 * 10^{-4}, \quad k_1 = \sum_{i=0}^3 \frac{(M_{i1} - M_{i*1})^2}{M_{01}^2} = 0,$$

$$k_2 = \sum_{i=0}^3 \frac{(M_{i2} - M_{i*2})^2}{M_{02}^2} = 0,111, \quad k_3 = \sum_{i=0}^3 \frac{(M_{i3} - M_{i*3})^2}{M_{03}^2} = 0,778,$$

$$K_{общ} = 0,223.$$

Значения показателей: угол наклона аппроксимирующей функции, время нарастания кривой давления до максимума, длительности фазы вдоха/выдоха дыхания испытуемого 1 с увеличением сопротивления в дыхательном контуре значительно возрастают (рисунки 2-3). У испытуемого 2 наблюдается незначительное изменение показателей, что свидетельствует о меньшем уровне тренированности дыхательной системы. Коэффициент общей реакции двух испытуемых отличается в три раза.

Используя комплекс [1, 2], происходит тренировка дыхательной системы человека и повышается устойчивость к оказываемой нагрузке. Для улучшения результативности необходимо повышать начальную нагрузку на дыхательную систему от тренировки к тренировке, опираясь на объективные показатели прогресса дыхательной системы. Таким показателем является общий коэффициент реакции испытуемого на изменение сопротивления в дыхательном контуре, принимающий значения в диапазоне от 0,2 до 0,9, анализируя который автоматически определяется первоначальный уровень нагрузки. По результатам обследования 27 испытуемых рассчитаны значения общего коэффициента реакции человека при разных перекрытиях дыхательного контурам (таблица 1). Характеристики дыхательной системы и прогресс тренирован-



ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

ности дыхательной мускулатуры у различных пациентов являются индивидуальными, точная подстройка сопротивления в дыхательном контуре совершается в процессе тренировки.

Таблица 1

Общий коэффициент реакции испытуемого
в зависимости от начального сопротивления

Общий коэффициент реакции испытуемого	Перекрытие дыхательного контура
0,2	15%
0,3	23%
0,4	31%
0,5	39%
0,6	47%
0,7	55%
0,8	63%
0,9	70%

В процессе работы комплекса корректирующего воздействия происходит отслеживание динамики тренированности дыхательной системы, и производится анализ возможного увеличения или уменьшения начальной нагрузки на дыхательную систему.

На рисунке 4 изображены два графика зависимости общего коэффициента реакции испытуемого от номера тренировки. Как видно из графиков, начальный уровень тренированности пациентов разный, и скорость прогресса показателей тоже значительно отличается. Опираясь на эти данные, можно сделать вывод, что начальная нагрузка и увеличение нагрузки от тренировки к тренировке у пациента 1 и пациента 2 будут различными. Пациент 1 имеет более низкий начальный уровень тренированности, но прогресс показателей у него более высокий по сравнению с пациентом 2.

Корректировка уровня сопротивления в дыхательном контуре осуществляется по следующей формуле:

$$R_N = \frac{K_{общ.N} - K_{общ.N-1}}{K_{общ.N-1}} \cdot R_{N-1} + R_{N-1},$$

где $K_{общ.N}$ – коэффициент общей реакции испытуемого за текущую тренировку; $K_{общ.N-1}$ – коэффициент общей реакции испытуемого за прошлую тренировку;

R_N – сопротивление в контуре за текущую тренировку;

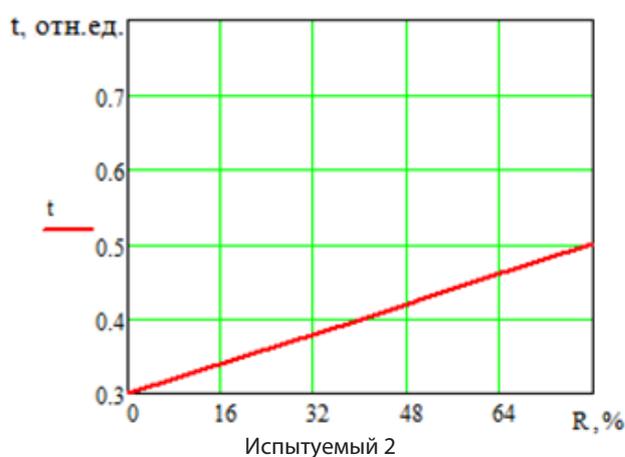
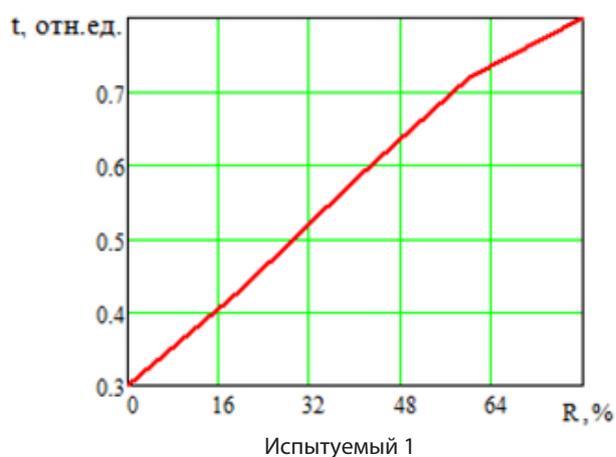


Рис. 3. Зависимость времени нарастания кривой давления до максимума от сопротивления

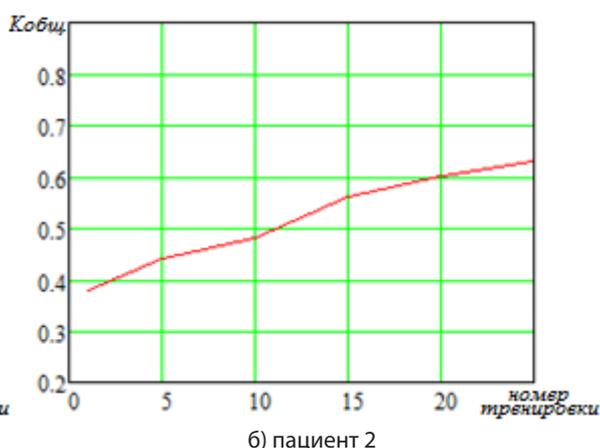
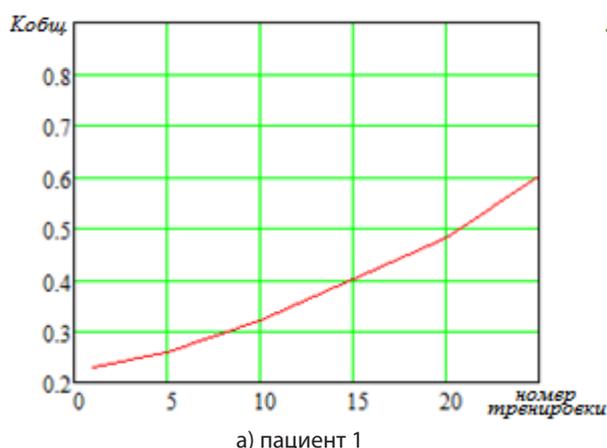


Рис. 4. Зависимость общего коэффициента реакции от номера тренировки

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

R_{N-1} – сопротивление в контуре за прошлую тренировку.

На *рисунке 5* представлен коэффициент общей реакции испытуемого в течение 10 тренировок, на *рисунке 6* уровень сопротивления в дыхательном контуре, полученный в результате расчетов. Как видно из графиков уровень сопротивления в дыхательном контуре рассчитывается, исходя из прогресса испытуемого, что позволяет адаптировать нагрузку в зависимости от динамики развития дыхательной системы.



Рис. 5. Коэффициент общей реакции испытуемого

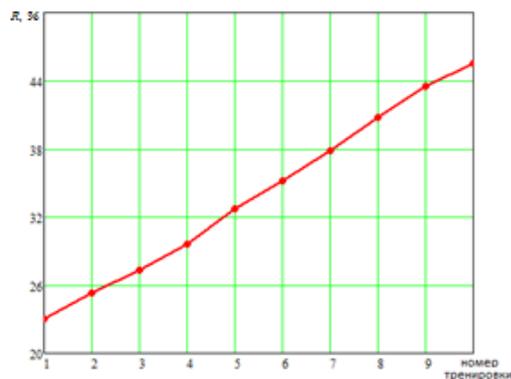


Рис. 6. Уровень сопротивления в дыхательном контуре

Приведенные расчеты начального уровня сопротивления в дыхательном контуре, основанные на анализе изменения параметров матрицы состояний, характеризующей дыхательную систему каждого человека, позволяют построить алгоритмы адаптивного управления нагрузкой в дыхательном контуре и осуществлять подстройку ее начального значения.

Литература

1. Ивахно Н.В. Формирование общей совокупности информативных признаков для идентификации состояния дыхательной системы // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2015. Вып.8. В 2-х ч. Ч. 1. С.106-111.
2. Ивахно Н.В., Анцибор С.В. Параметрический анализ характеристик дыхания при реализации релейного режима воздействия // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2015. Вып. 5. В 2-х ч. Ч. 2. С. 78-84.
3. Ивахно Н.В., Чуков А.Н. Метод адаптивного обнаружения начала инспираторной активности в комплексах корректирующего воздействия на дыхательную систему человека (материалы доклада). Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». Пенза: Изд-во ПГУ, 2016. № 2. С.286-288.
4. Ивахно Н.В. Оптимальный информационный алгоритм поиска места отказа в интеллектуальных тренажерах дыхательной мускулатуры // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки, 2015. №2. С.5-15.
5. Ivakhno N., Fedorov S. Adaptive stress control method used in remedial action complexes for human respiratory system. XII Russian-German conference on biomedical engineering Proceedings of the 12th Russian-German Conference on Biomedical Engineering. 2016. С.243-246.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 681.513

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ СХЕМ АНАЛОГО–ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ СИНУСНО–КОСИНУСНОГО ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ТРАНСФОРМАТОРА

ERROR ANALYSIS OF ANALOG–TO–DIGITAL SIGNAL PROCESSING OF A SINE–COSINE ROTATING TRANSFORMER

Владимир Александрович Смирнов

кандидат технических наук, доцент
доцент кафедры «Приборы и биотехнические системы»
ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
Адрес: 300012, г. Тула, проспект Ленина, д. 92
Тел.: 8(4872) 35-05-52
E-mail: veld071@rambler.ru

Сергей Владимирович Шеламо

кандидат технических наук
заместитель начальника отдела
ФГБУ 4 ЦНИИ МО РФ
Адрес: 141091, Московская обл., г. Королёв,
мкр. Юбилейный, ул. М.К. Тихонравова, д. 29
Тел.: 8 (977) 444-36-02

Аннотация

Рассмотрены различные схемы обработки сигналов синусно-косинусного вращающегося трансформатора (СКВТ). Получены выражения для оценки погрешностей СКВТ от различных факторов.

Ключевые слова: синусно-косинусный вращающийся трансформатор, погрешности, схема обработки, аналого-цифровое преобразование.

Summary

Signal processing circuits for sine-cosine rotating transformer are considered. Formulas for errors of resolver from different causes are obtained.

Keywords: sine-cosine rotating transformer, errors, processing, analog-to-digital conversion.

Введение

Широкое применение в качестве датчиков угла синусно-косинусных вращающихся трансформаторов обусловлено их высокой надежностью, малой чувствительностью к условиям окружающей среды и высокой точностью определения угла поворота. Поскольку практически все современные системы управления являются цифровыми, актуальным является вопрос о выборе схемы обработки сигнала СКВТ для считывания угла поворота цифровой системой. На рисунке 1 показана обобщенная структура блока обработки сигнала СКВТ.

С учетом погрешностей выходной сигнал СКВТ можно представить в виде:

$$\begin{aligned} U_s(t) &= (U_0 + \Delta U) \sin(\varphi + \Delta\varphi) \sin(\omega_0 t + \Delta\psi_1), \\ U_c(t) &= U_0 \cos(\varphi) \sin(\omega_0 t + \Delta\psi_2), \end{aligned} \quad (1)$$

где ω_0 – частота напряжения возбуждения СКВТ;

U_s – выходной сигнал синусной обмотки;

U_c – выходной сигнал косинусной обмотки;

U_0 – амплитуда выходного напряжения СКВТ;

φ – угол поворота датчика угла;

$\Delta\varphi$ – погрешность фазового сдвига между синусной и косинусной зависимостями;

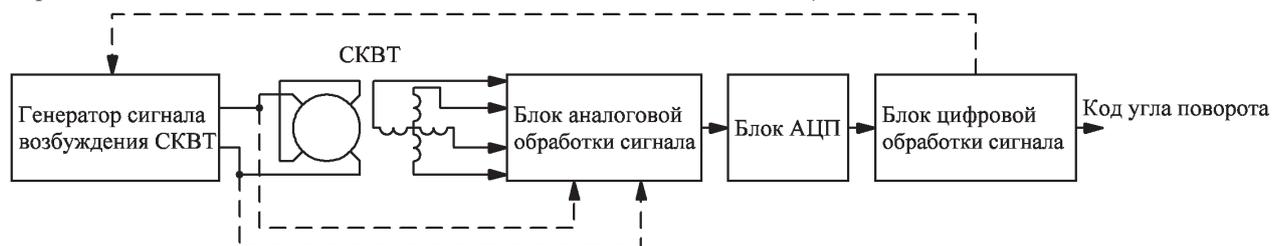


Рис. 1. Обобщенная структурная схема обработки сигнала СКВТ

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

$\Delta\varphi_1$ и $\Delta\varphi_2$ – фазовые сдвиги выходного напряжения синусной и косинусной обмоток по отношению к напряжению питания.

Рассмотрим различные методы обработки сигнала СКВТ [1]. При этом отметим, что амплитуда выходного сигнала СКВТ U_0 и фазовые сдвиги 1 и 2, зависит от амплитуды и частоты сигнала возбуждения.

Метод аналогового детектирования сигнала СКВТ

С точки зрения технической реализации наиболее простым является метод аналогового детектирования с выделением низкочастотных огибающих, пропорциональных $\sin()$ и $\cos()$, с последующим их преобразованием в цифровую форму и вычислением угла. После такого детектирования с учетом наличия в детекторе фильтра низких частот сигналы будут иметь вид:

$$\begin{aligned} U_{ds} &= 0,5(U_0 + \Delta U) \sin(\varphi + \Delta\varphi) \cos(\Delta\psi_1) + U_{cm s}, \\ U_{dc} &= 0,5U_0 \cos(\varphi) \cos(\Delta\psi_2) + U_{cm c}. \end{aligned} \quad (2)$$

где $U_{cm s}$, $U_{cm c}$ – напряжение смещения нуля каналов синусной и косинусной обмоток, соответственно.

Заметим, что фазовые сдвиги $\Delta\varphi_1$, $\Delta\varphi_2$ и $\Delta\varphi$ погрешность от разности амплитуд сигналов ΔU в формуле (2) отличаются от таковых в формуле (1) в силу влияния канала обработки сигналов.

После преобразования сигналов (2) в цифровую форму угол поворота вычисляется в микропроцессорной системе по формулам:

$$\begin{aligned} \varphi' &= \begin{cases} \varphi_{add} + \arctan \frac{U_{ds}}{U_{dc}} & \text{если } |U_{dc}| > |U_{ds}|, \\ \varphi_{add} - \arctan \frac{U_{dc}}{U_{ds}} & \text{если } |U_{dc}| \leq |U_{ds}|, \end{cases} \\ \varphi_{add} &= \begin{cases} \frac{\pi}{2} \cdot \text{sign}(\arctan \frac{U_{dc}}{U_{ds}}) \cdot \text{sign}(U_{dc}), & \text{если } |U_{dc}| \leq |U_{ds}|, \\ 0, & \text{если } |U_{dc}| > |U_{ds}| \text{ и } U_{dc} > 0, \\ -\pi \cdot \text{sign}(\arctan \frac{U_{dc}}{U_{ds}}), & \text{если } |U_{dc}| > |U_{ds}| \text{ и } U_{dc} \leq 0. \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

Некоторая громоздкость формулы связана с необходимостью избежать деления на ноль.

Рассматривая зависимость погрешностей определения угла от погрешностей СКВТ, получим выражение для тангенса угла на выходе системы обработки:

$$\text{tg}\varphi' = \frac{(U_0 + \Delta U) \sin(\varphi + \Delta\varphi) \cos(\Delta\psi_1) + U_{cm s}}{U_0 \cos(\varphi) \cos(\Delta\psi_2) + U_{cm c}}, \quad (4)$$

где φ' – измеряемое значение угла поворота.

Анализ формулы (4) показывает, что в случае, если фазовые сдвиги $\Delta\varphi_1$, $\Delta\varphi_2$ невелики, они не будут оказывать заметного влияния на погреш-

ность преобразования и в дальнейшем их можно исключить из рассмотрения.

Для погрешностей смещения нуля синусного и косинусного каналов, считая их малыми, получим:

$$\sin(\alpha_{cm s}) \approx \alpha_{cm s} \approx \frac{U_{cm s}}{U_0} \cos(\varphi), \quad \sin(\alpha_{cm c}) \approx \alpha_{cm c} \approx \frac{U_{cm c}}{U_0} \sin(\varphi), \quad (5)$$

Таким образом, в наихудшем случае погрешность от напряжения смещения соответствует относительной величине напряжения смещения.

Для достижения погрешности измерения угла в одну угловую минуту, относительная величина напряжения смещения на входе АЦП не должна превышать 0,03% от амплитуды полезного напряжения. Таким образом, для выходного напряжения с амплитудой 12 В напряжение смещения не должно превышать 3,6 мВ, что вполне достижимо при современном уровне развития элементной базы.

Для малых погрешностей от фазового сдвига между синусной и косинусной обмотками $\Delta\varphi$ получим:

$$\alpha_\varphi \approx \Delta\varphi \cos(\varphi)^2. \quad (6)$$

Таким образом, в наихудшем случае погрешность измерения угла поворота будет равна фазовому сдвигу между синусной и косинусной зависимостью. Таким образом, для погрешности измерения угла в 1 угл. мин. фазовые характеристики каналов обработки сигнала не должны различаться более, чем на 1 угловую минуту. Указанное соотношение также предъявляет требования к синхронизации каналов АЦП. Поскольку сигнал φ является относительно низкочастотным (частота его изменения, как правило, не превышает нескольких сотен Гц, а чаще составляет единицы и доли Гц), данное требование не является определяющим при разработке тракта обработки сигнала СКВТ. Данное требование в основном, относится к самому датчику.

Для погрешности от разности амплитуд синусной и косинусной обмоток получим:

$$\sin(\alpha_{cm s}) = \frac{\Delta U \sin(2\varphi)}{U_0 \cdot 2}. \quad (7)$$

Таким образом, погрешность измерения угла поворота будет прямо пропорциональна разности амплитуд выходных сигналов синусного и косинусного каналов (фактически – разности коэффициентов передачи этих каналов).

Из проведенного анализа следует, что для точного измерения угла поворота необходимо обеспечивать идентичность характеристик двух каналов детектирования. Так расчет по формуле показывает, что для достижения погрешности

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

измерения угла в одну угловую минуту, относительная разность коэффициентов передачи не должна превышать 0,06%. Для двух отдельных каналов необходимо, чтобы погрешность установки коэффициента передачи каждого канала не превышала 0,03%, что является весьма жестким требованием.

Еще одним недостатком данного метода является наличие фазового запаздывания сигнала в фильтре низких частот детектора.

Заметим, что шумовые составляющие сигнала φ' определяются шумами квантования АЦП, поскольку в аналоговом тракте их подавляет фильтр низких частот на выходе синхронного детектора. Влияние погрешности квантования АЦП будет аналогично влиянию погрешности ΔU . Соответственно, шаг квантования должен удовлетворять условию, аналогичному (7):

$$\sin(\alpha_{\text{кв}}) = \frac{1}{2^n} \sin(2\varphi), \quad (8)$$

где $\alpha_{\text{кв}}$ – погрешность определения угла, вызванная квантованием в АЦП;

n – число разрядов АЦП.

Расчет показывает, что для получения погрешности измерения угла в одну угловую минуту необходим как минимум двенадцатиразрядный АЦП.

Метод непосредственного преобразования сигнала СКВТ

При непосредственном преобразовании входные сигналы синусной и косинусной обмоток вместе с сигналом возбуждения сразу преобразуются в цифровую форму.

При непосредственном преобразовании выходные сигналы синусной и косинусной обмоток сразу преобразуются АЦП в цифровую форму. Аналоговый тракт в этом случае осуществляет только нормирование сигнала перед его поступлением на вход АЦП. Если угол поворота не превышает угол можно определить по формуле:

$$\varphi = \begin{cases} \arctan \frac{U_s}{U_c} & \text{если } |U_c| \geq |U_s|, \\ \frac{\pi}{2} \cdot \text{sign} \frac{U_c}{U_s} - \arctan \frac{U_c}{U_s} & \text{если } |U_c| < |U_s|, \end{cases} \quad (9)$$

Хотя формулы для вычисления погрешностей в данном случае будут аналогичны случаю 1, реальные погрешности преобразования будут существенно меньше, что обусловлено несколькими факторами:

1. При непосредственном преобразовании не требуется аналоговых синхронных детекторов, что уменьшает инструментальные погрешности и упрощает схему аналоговой части;

2. Преобразование в цифровую форму высокочастотного сигнала позволяет выполнять калибровку коэффициентов передачи при цифровой обработке сигнала, что исключает влияние погрешности ΔU на результат преобразования;

3. Работа непосредственно с модулированным сигналом обеспечивает малые задержки в определении угла;

4. Цифровая фильтрация сигнала вместо аналоговой обеспечивает намного лучшую стабильность характеристик измерительной системы.

Следует отметить, что в данном случае необходимо наличие двух синхронно работающих АЦП с высоким быстродействием, т.к. частота преобразования должна быть существенно выше частоты возбуждения ω_0 . Частота возбуждения современных СКВТ составляет 1-10 КГц, таким образом, требуемая частота дискретизации АЦП должна быть около 100 КГц.

Метод следящего преобразования сигнала СКВТ

Во многих современных схемах для эффективного подавления шумов применяют следящее преобразование [2,3,4]. Структурная схема следящего преобразования показана на рисунке 2.

В случае следящего преобразования, как и в

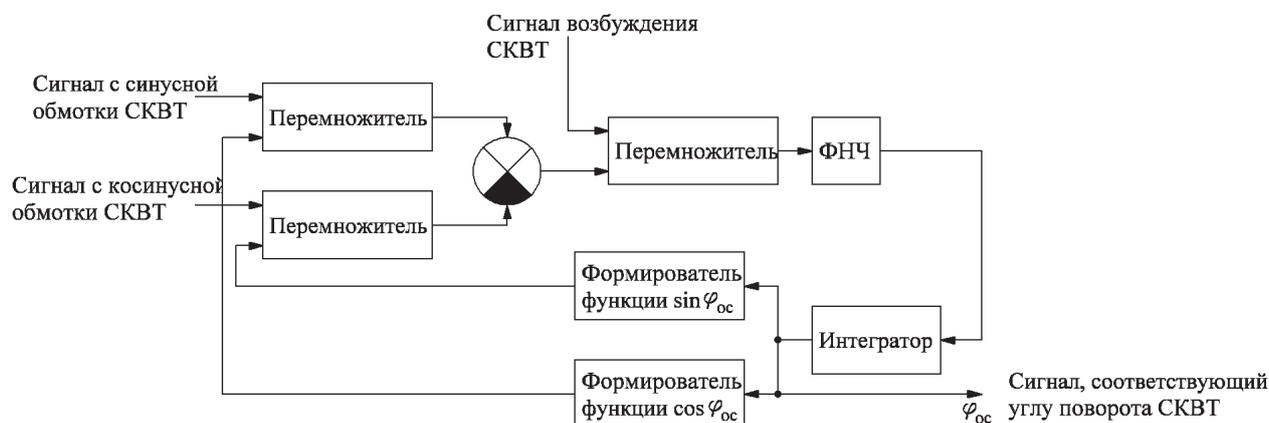


Рис. 2. Структурная схема следящего преобразования

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

схеме непосредственного преобразования, вся обработка сигнала СКВТ осуществляется в цифровой части системы. Суть преобразования заключается в том, что сигнал угла поворота СКВТ моделируется следящей системой. Поскольку выходной сигнал моделируется интегратором, шумы значительно подавляются.

Цепь обратной связи обеспечивает приближение $\Phi_{OC} \approx \varphi$. В этом случае можно записать:

$$U_{OC} \approx 0,5U_0(\varphi - \varphi_{OC}) - 0,25U_0 \left[\left(\frac{\Delta\varphi^2}{2!} - \frac{\Delta\varphi^4}{8!} + \dots \right) \left(\frac{\Delta\psi_1^2}{2!} - \frac{\Delta\psi_1^4}{8!} + \dots \right) - \left(\frac{\Delta\psi_2^2}{2!} - \frac{\Delta\psi_2^4}{8!} + \dots \right) \right] \sin(2\varphi) + 0,25U_0 \sin(2\varphi) \cos(\Delta\varphi) \sin(\Delta\psi_1) + 0,5(U_0 + \Delta U) \cos^2(\varphi) \sin(\Delta\varphi) \cos(\Delta\psi_1) + 0,25\Delta U \sin(2\varphi) \cos(\Delta\varphi) \cos(\Delta\psi_1). \quad (10)$$

где U_{OC} – сигнал на выходе фильтра низких частот (сигнал обратной связи).

Преобразуя (10), получим оценку погрешности схемы обработки сигнала СКВТ:

$$d\varphi = \frac{U_{OC}}{0,5U_0} + 0,5 \left[\left(\frac{\Delta\varphi^2}{2!} - \frac{\Delta\varphi^4}{8!} + \dots \right) \left(\frac{\Delta\psi_1^2}{2!} - \frac{\Delta\psi_1^4}{8!} + \dots \right) - \left(\frac{\Delta\psi_2^2}{2!} - \frac{\Delta\psi_2^4}{8!} + \dots \right) \right] \sin(2\varphi) - 0,5 \sin(2\varphi) \cos(\Delta\varphi) \sin(\Delta\psi_1) - \left(1 + \frac{\Delta U}{U_0} \right) \cos^2(\varphi) \sin(\Delta\varphi) \cos(\Delta\psi_1) - 0,5 \frac{\Delta U}{U_0} \sin(2\varphi) \cos(\Delta\varphi) \cos(\Delta\psi_1). \quad (11)$$

При идеальной работе следящей системы погрешность определения угла, вызванная погрешностью U , будет равна:

$$d\varphi_U \approx \frac{0,5\Delta U}{U_0} \sin(2\varphi). \quad (12)$$

Таким образом, значение погрешности, вызванной разностью коэффициентов передачи по каналам, будет зависеть от текущего значения угла. Значение данной погрешности будет максимальным при значениях угла $\varphi = /4 \pm n$, где $n=0,1,2,\dots$

Если отлична от нуля только погрешность $\Delta\varphi$, получим:

$$d\varphi_\varphi \approx \cos^2(\varphi) \Delta\varphi. \quad (13)$$

Если отличны от нуля только погрешности $\Delta\psi_1$ и $\Delta\psi_2$:

$$d\varphi_\psi \approx 0,5 \sin(2\varphi) \left(\frac{\Delta\psi_2^2}{2!} - \frac{\Delta\psi_2^4}{8!} + \dots + \sin(\Delta\psi_1) \right). \quad (14)$$

Формула (14) показывает, что если $\Delta\psi_1$ и $\Delta\psi_2$ малы, то их влияние будет пренебрежимо малым, как и в других схемах.

Реализация следящего преобразования требует наибольших вычислительных ресурсов. Кроме того, в методе следящего преобразования будет присутствовать погрешность, обусловленная инерционностью контура обратной связи. Данная погрешность, как следует из структурной схемы на рисунке 2, будет пропорциональна скорости вращения СКВТ. Реализация данного метода, в отличие от двух других, требует жесткой синхронизации при выполнении алгоритма, поскольку он реализует систему с обратной связью и должен обеспечивать ее устойчивость.

Заключение

Анализ погрешностей и схемотехнических требований к различным схемам обработки сигнала СКВТ показывает, что наиболее целесообразной с точки зрения баланса сложности и точности является схема непосредственного преобразования. Результаты экспериментальных исследований схемы непосредственного преобразования, реализованной на микропроцессоре LPC2138FBD64 с датчиком угла 2,5БВТ-Д, показали работоспособность и высокую точность данного метода при весьма простой реализации.

Литература

1. Ануфриев В., Лужбинин А., Шумилин С. Методы обработки сигналов индуктивных датчиков линейных и угловых перемещений // Современная электроника, 2014. №4. С.30-33.
2. Ануфриев В., Лужбинин А., Шумилин С. Микросхема преобразователя угол-код для индуктивных датчиков // Современная электроника, 2015. №3. С.44-47.
3. Прокофьев Г., Стахин В., Обеднин А. К1382НХ045 – микросхема преобразователя фазы квадратурного сигнала в код положения // Современная электроника, 2014. №6.
4. Jakub Szymczak, Shane O'Meara, Johnny S. Gealon, Christopher Nelson De La Rama. Precision resolver-to-digital converter. Measures angular position and velocity / Analog Dialogue. 2014, March. pp.48-03.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 53.087.45: 57.084.1: 57.087.1

О НЕКОТОРЫХ АСПЕКТАХ РЕГИСТРАЦИИ И ОБРАБОТКИ СЛАБОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

ON SOME ASPECTS OF THE REGISTRATION AND PROCESSING OF LOW-CURRENT ELECTRICAL SIGNALS

Борис Фёдорович Безродный

доктор технических наук, профессор
заведующий кафедрой прикладной математики
Московский автомобильно-
дорожный государственный
технический университет (МАДИ)
Адрес: 125319, Москва,
Ленинградский проспект, д. 64
Тел. +7 (903) 774-28-26
E-mail: boris-bezrodny@yandex.ru

Елена Гавриловна Ионкина

кандидат медицинских наук, доцент
кафедра нормальной физиологии
Первый Московский государственный
медицинский
университет им. И. М. Сеченова
(Сеченовский Университет)
Адрес: 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, с. 4
Тел.: +7 (495) 692-67-93
E-mail: helena.ionkina@sechenov.ru

Андрей Валентинович Колчин

кандидат физико-математических наук, доцент
кафедра прикладной математики
Московский автомобильно-
дорожный государственный
технический университет (МАДИ)
Адрес: 125319, Москва,
Ленинградский проспект, д. 64
Тел.: +7 (925) 991-34-98
E-mail: akolchin@madi.ru

Аннотация

Дается описание портативной установки для регистрации слаботоочных электрических сигналов и обсуждается ряд проблем, возникших при ее разработке, сборке, настройке и использовании.

Ключевые слова: регистрация слаботоочного сигнала, непрерывная регистрация нескольких аналоговых каналов.

Summary

We describe a portable system for acquisition of weak-current electric activity and discuss a series of problems which arise in the process of its building, setting-up, and utilisation.

Keywords: weak current acquisition, continuous acquisition of several analogue channels.

Введение. Постановка задачи

Нами разработана, собрана и отлажена портативная установка для регистрации слаботоочных электрических сигналов, которая была успешно применена для изучения электрической активности головного мозга крысы. Подробное описание первых вариантов реализации установки и самого эксперимента можно найти в [1–6].

Важными характеристиками описываемой установки является высокая чувствительность (μV), отсутствие фильтров, а также высокое разрешение измерений (с частотой до 1 МГц), что ведет к практическому отсутствию потерь данных при регистрации электрических сигналов в режиме реального времени.

Предотвращение искажения регистрируемого сигнала от внешних электромагнитных шумов было обеспечено многослойным экранированием исследуемого объекта и обеспечением автономного питания установки постоянным током. Данная установка портативна и может работать под управлением мини-компьютера.

Если лабораторное животное принять в качестве «черного ящика», на вход которого может быть подан некоторый внешний стимул и на выходе которого имеем постоянный поток данных высокой интенсивности, то задачей эксперимента является накопление выходящих данных для последующего анализа, в том числе выделения отклика на входной стимул в потоке выходных данных.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Описание экспериментальной установки

Регистрация слабых электрических сигналов, например, электрической активности головного мозга, осуществляется в условиях интенсивного электромагнитного загрязнения окружающей среды, характерного для современных мегаполисов, что потребовало многослойного экранирования аналоговой части системы. Помехи от сетевого электропитания были исключены посредством питания всей установки исключительно от автономного источника постоянного тока.

Вследствие неизбежного естественного износа и устаревания компьютерного и другого лабораторного оборудования, возникла необходимость проведения существенной модернизации установки, описанной в [1, 3].

Воздействие на исследуемый объект прямоугольными импульсами фиксированной силы тока в настоящее время осуществляется посредством токового изолятора стимулов (токового стимулятора) A365D, управляемого внешним TTL-сигналом, производства World Precision Instruments, Inc. Питание изолятора обеспечивается батареей из 16 щелочных элементов типа PP3 (6LR61, «Крона») напряжением 9 В каждый.

В настоящей экспериментальной установке возможно гибкое управление стимулирующими импульсами посредством мини-компьютера. В нашем эксперименте начало записи электрической активности определяется синхронизирующим импульсом, соответствующим произвольно выбранному фиксированному моменту времени до переднего фронта стимулирующего импульса.

Для реализации выдачи управляющего импульса на токовый изолятор и соответствующего синхронизирующего импульса для начала записи электрической активности необходимо параллельно с точностью до микросекунд управлять несколькими TTL-сигналами на выходе управляющего компьютера. В этом качестве мы выбрали поэтому мини-компьютер Raspberry Pi 3B+ на базе 64-разрядного четырехъядерного процессора ARM Cortex-A53 с тактовой частотой 1,4 GHz, имеющий исчерпывающе документированный интерфейс ввода/вывода общего назначения (General Purpose Input/Output, GPIO), поддерживаемый большим числом программных библиотек с открытым исходным кодом; нами используется библиотека wiringPi. В качестве операционной системы выбрана система Raspbian (последней на момент представления статьи версии Stretch). Для надежного экранирования плата компьютера Raspberry Pi помещена в металлический корпус.

Аналого-цифровой преобразователь вы-

бирался из числа поддерживаемых проектом COMEDI [7], имеющим целью разработку инструментов и библиотек с открытым кодом для сбора данных, реализованных в виде модулей ядра операционной системы, поддерживающих режим реального времени. Нами был выбран 16-канальный АЦП usbdx-fast, который, как и 4-канальный усилитель, собран по открытым спецификациям [8, 9], предоставленным Incite Technology Ltd., Computing & Maths Dept., University of Stirling, Великобритания; усилитель первоначально был разработан для обучения технике ЭКГ на медицинском факультете в Ruhr-Universität Bochum. Использовались общедоступные электронные компоненты на заказных печатных платах. Принципиальные схемы АЦП и усилителя можно найти в [3, 8, 9]. Благодаря наличию открытых исходных текстов как библиотек, так и микропрограммного обеспечения АЦП, во время экспериментов были успешно за минимальных срок внесены необходимые изменения и доработки.

Регистрация данных осуществляется в настоящее время посредством портативного компьютера типа Raspberry Pi 3B+ под управлением системы Raspbian Stretch, в ядро которой был внесен ряд модификаций и подключены модули, взаимодействующие с библиотекой libcomedi и позволяющие управлять используемым нами АЦП, дополненного скоростным SATA накопителем высокой емкости форм-фактора 2,5" с интерфейсной платой X820 v3.0 разработки SupTronics Ltd. [13], заключенными в экранирующий и теплоотводящий цельнометаллический корпус. Для взаимодействия пользователя с компьютерами, входящими в состав установки, используется модуль экрана/клавиатуры типа Motorola LapDock.

Для наблюдения регистрируемого сигнала удобно использовать программу xoscope [10]. Для записи регистрируемых данных оказалось возможным использовать программу ktimetrace [11], однако потребовалась ее существенная переработка [12]; она позволяет записывать данные, получаемые с желаемых каналов, за заданный промежуток времени, начиная как с произвольного момента, так и с момента, определяемого синхронизирующим сигналом от компьютера, управляющего подачей воздействия на исследуемый объект. Записанные таким образом данные представляют собой обычный текстовый файл, каждая строка которого представляет собой числовые значения, полученные из каналов в соответствующий момент времени. Размер файла достигает чрезвычайно больших значений, что влечет использование соответ-

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

ствующей файловой системы (мы выбрали ext4).

Питание всей системы осуществляется полностью от автономного источника постоянного тока.

Реализована возможность просмотра входящих данных и результатов их обработки по мере их накопления в графической форме непосредственно в ходе эксперимента.

Важной характеристикой установки является то, что в составе ни аналого-цифрового преобразователя, ни усилителя не присутствуют какие-либо фильтры входного сигнала, ведущие к неизбежной потере исходных данных. Тем не менее, при необходимости возможна программная фильтрация входного сигнала в режиме реального времени.

Заключение

Ключевыми особенностями настоящей системы сбора данных является высокая чувствительность, отсутствие необходимости в применении как аппаратных, так и программных фильтров, и высокое разрешение измерений, что ведет к практическому отсутствию потерь данных при регистрации слабых электрических сигналов в режиме реального времени.

Данная установка является портативной, что обеспечивает удобство ее использования.

Совокупность решений, примененных при сборке, настройке и практическом использовании описываемой системы сбора данных, обладает несомненной новизной и позволяет решать широкий круг задач, в том числе в области электрофизиологии.

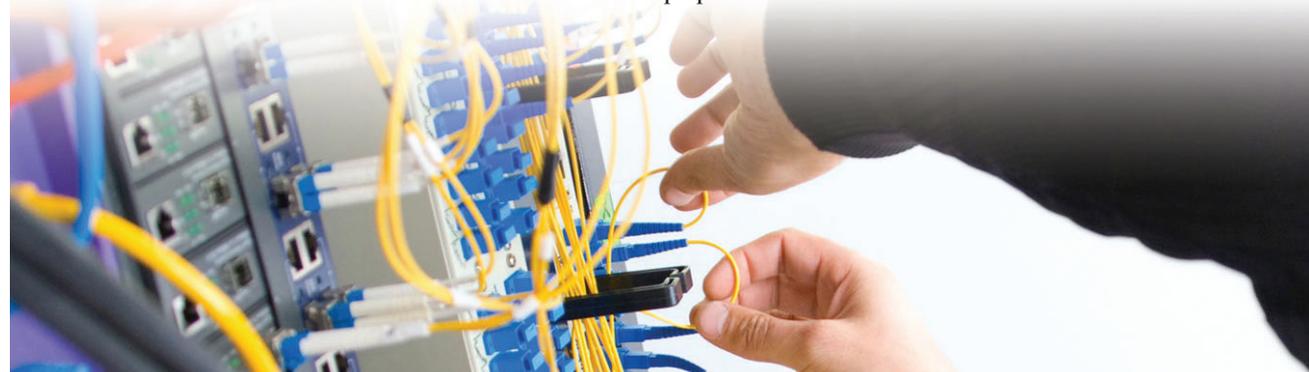
На момент представления статьи все обсуждаемое оборудование находится в серийном производстве и доступно для заказа.

Благодарности

Авторы выражают глубокую благодарность Хелио Чиссини де Кастро, ведущему инженеру проекта K Desktop Environment (KDE), переработавшему ktimetrace для современных компьютеров различных архитектур под управлением Linux.

Литература

1. Ionkina E.G., Kolchin A.V. On acquisition of nociceptive evoked potentials in rats cerebral cortex // Computer Data Analysis and Modeling: Theoretical and Applied Stochastics, 1. Belarusian State Univ. Publ, Minsk, 2013. Pp.72-73.
2. Ionkina E.G., Kolchin A.V. Nociceptive evoked potentials of somatosensory and cingulum areas in rats cerebral cortex under pyrogenal injection // XXII Съезд Физиологического общества им. И. П. Павлова. Волгоград: ВолгГМУ, 2013. С.203.
3. Ионкина Е.Г., Колчин А.В. О регистрации электрической активности головного мозга крысы // Труды Карельского научного центра РАН, 2015. №11, С.62-66.
4. Ionkina H.G., Kolchin A.V. On acquisition of brain electrical activity // Обозрение прикладной и промышленной математики, 2016. Т.23, №2. С.182-183.
5. Ionkina H.G., Kolchin A.V. On some aspects in acquisition of brain electrical activity // Computer Data Analysis and Modeling: Theoretical and Applied Stochastics. Belarusian State Univ.\ Publ, Minsk, 2016. Pp. 285-287.
6. Ионкина Е.Г., Колчин А.В., Крылова Е.Н. Некоторые аспекты регистрации электрической активности головного мозга // Нейронаука для медицины и психологии. МАКС-Пресс, Москва, 2016. С.183-184.
7. Schleeff D., Hess F.M., Abbott I. Comedi: Linux control and measurement device interface. 2014. URL: <http://www.comedi.org>.
8. Porr B. USBDUX-fast: Product description. 2007. URL: http://linux-usb-daq.co.uk/prod2_duxfast.
9. Porr B. ECG preamplifier for the USBDUX-D. 2012. URL: <http://linux-usb-daq.co.uk/howto2/ecg>.
10. Witham T. Xoscope for Linux. 2016. URL: <http://xoscope.sourceforge.net>.
11. Hess F.M. KTimeTrace. 2005. URL: <http://ktimetrace.sourceforge.net>.
12. De Castro H. C. KTimeTrace porting. 2018. URL: <https://github.com/heliocastro/ktimetrace>.
13. Raspberry Pi X820 SATA Expansion Board. 2018. URL: <http://www.raspberrypiwiki.com/index.php/X820>.



ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 629.7

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

THE CURRENT STATE AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF OPTICAL- ELECTRONIC MEANS OF SPACECRAFT

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

Рафаэль Рамисович Казаков

старший преподаватель
ВКА имени А.Ф. Можайского
Адрес: 197198, Санкт-Петербург,
ул. Ждановская, д. 13
Тел.: 8 (812) 237-12-49

Дмитрий Вячеславович Смирнов

почетный работник науки и техники РФ
доктор технических наук, доцент
действительный член АИИ
профессор кафедры
ФГБОУ ВО МАИ (НИУ)
Генеральный директор –
Первый Вице-президент Института
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7 (4967) 35-31-93

Аннотация

В статье проведен анализ современного состояния опτικο-электронных средств, размещаемых как на Земле, так и в околоземном космическом пространстве. Рассмотрены основные проблемы развития опτικο-электронных средств навигации и ориентации, а также наблюдения и разведки космических аппаратов. Предложены способы повышения точностных характеристик этих устройств.

Ключевые слова: космический аппарат, опτικο-электронные средства, звездный датчик.

Summary

The article analyzes the current state of optics-electronic devices located both on Earth and in near-Earth space. Discusses the main problems of the development of optical-electronic navigation and orientation tools, as well as observation reconnaissance of spacecraft. Proposed ways to improve the accuracy of the characteristics of these devices.

Keywords: spacecraft, optical electronic devices, star sensor.

Введение

Современное положение дел в мире привело к тому, что правительства ведущих держав не в состоянии разрешать разногласия, возникающие в сфере борьбы за природные ресурсы, мирным путем. Особый интерес во всем мире вызывают значительные территории России, богатые своими резервами. Государства, входящие в блок НАТО, все чаще создают конфликтные ситуации у границ Российской Федерации (РФ), пытаясь ослабить боевой потенциал страны. В то же время, внешняя политика РФ построена таким образом, чтобы игнорировать провокации стран-агрессоров и не допустить вовлечение РФ в затяжные военные действия вблизи и на своей территории.

Примером тому может послужить Сирийская операция, начавшаяся для России в 2015 г. и про-

должающаяся по настоящее время. Конфликт в Сирии начался в 2011 г. с антиправительственных протестов и радикальной критики оппозицией власти. К настоящему времени количество участников конфликта значительно увеличилось, причем каждая из сторон преследует свои интересы. РФ выступила в поддержку власти Башар Асада и существенно снизила напряженность в регионе. Российской армии (РА) удалось оптимизировать расходы, затраченные на передислокацию и вооружение большого количества военнослужащих РФ, участвующих в локализации конфликта.

Во-первых, боевые действия РА в Сирии активно использовались как полигон для испытания новых образцов вооружения и военной техники различного назначения. Во-вторых, частые ротации, проводимые командованием

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Министерства обороны (МО) РФ, позволили получить боевой опыт военнослужащих различных категорий РА. В-третьих, успех проведенных операций доказал всему миру, что с Россией лучше вести переговоры мирного характера, чем разговаривать на языке агрессоров.

Наиболее эффективно в ходе ведения боевых действий России в Сирийской Арабской Республике зарекомендовали себя беспилотные и другие летательные аппараты, в том числе космические аппараты (КА), предназначенные для наблюдения, разведки и ведения боевых действий. Большинство функций по наблюдению и сбору разведывательной информации возлагается на оптико-электронные средства (ОЭС).

ОЭС – устройства, предназначенные для решения различного спектра задач в интересах МО РФ, а так же исследовательских и научных интересах других организаций. ОЭС, в силу ряда важных свойств и преимуществ, все в большей степени внедряются во многие области науки и практики. Очень большое внимание ОЭС уделяется в вопросах, связанных с освоением околоземного космического пространства (ОКП), а также в вопросах связанных с исследованием поверхности Земли и месторождений ее ресурсов. Наряду с этим происходит дальнейшее интенсивное развитие ОЭС – совершенствуются и обогащаются теоретические основы, принципы построения и схемотехнические решения ОЭС.

Оптико-электронные средства навигации и ориентации космических аппаратов

Для ориентации и навигации КА применяются ОЭС – звездные датчики (ЗД), измеряющие направление на навигационные звезды. Изначально ЗД применялись для периодической коррекции работы высокоточных гироскопических устройств, которые требуют начальной выставки и накапливают значительные ошибки вследствие дрейфа. По информации с гироскопов велось непрерывное управление КА. Процедура астрокоррекции проводилась после стабилизации КА, что не требовало от ЗД способности работать в широком диапазоне угловых скоростей и ускорений. Необходимость выполнения маневров КА, увеличение сроков их активного существования, высокая стоимость гироскопических устройств и их недостаточный ресурс потребовали непрерывно использовать в управлении угловым движением КА приборы звездной ориентации. ЗД обеспечивает наиболее точное определение параметров ориентации, обладает высокой помехозащищенностью и надежностью. Поэтому круг задач, решаемых с применением оптико-электронных средств на-

вигации и ориентации по звездам на борту КА, существенно расширился [1].

Оптико-электронные средства наблюдения и разведки

ОЭС наблюдения и разведки – предназначены для приема и последующего преобразования собственного или отраженного от объектов оптического излучения в целях обнаружения и распознавания, а также определения их координат. ОЭС наблюдения и разведки подразделяются на оптические средства наземного (ОСН) и космического базирования (ОСК).

ОСН могут получать информацию для:

- определения класса и типа, состояния и выполняемые функции КА различного назначения;
- определения количества и принадлежности антропогенных космических объектов;
- исследования и сбора информации о состоянии ОКП.

ОСК могут получать информацию для:

- исследования различных космических объектов, в том числе Луны и планет солнечной системы;
- систематического осмотра земной поверхности и информационного наблюдения топографических карт;
- сбора информации для детального площадного и объектового наблюдения земной поверхности;
- определения и исследования новых месторождений природных ресурсов.

Перечень решаемых ОЭС КА задач значителен, но в силу особенности и сложности структуры построения ОСН и ОСК, качество решения некоторых из них не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к аппаратуре [2]. Способы повышения эффективности функционирования существующих и перспективных ОСН и ОСК имеют несколько путей развития, рассмотрим некоторые из них.

Перспективы развития ОЭС КА

Развитие приборов звездной ориентации идет по пути повышения точности, частоты обновления информации и диапазона рабочих угловых скоростей и ускорений. Необходимо отметить, что за последние 10-15 лет параметры приборов звездной ориентации по частоте обновления информации улучшились на порядок, а допустимым угловым скоростям и ускорениям – на два порядка при сохранении точностных параметров.

Для соответствия предъявляемым требованиям в ЗД необходимо улучшать параметры

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

оптической системы (ОС), приемника оптического излучения (ПОИ), а также совершенствовать алгоритмы обработки поступающей с него информации. В большинстве существующих отечественных ЗД в качестве ПОИ используются полнокадровые ПЗС-матрицы. В электронном тракте этих приборов реализованы схемотехнические решения для получения оконной выборки видеоинформации и ускоренного чтения ПЗС-матрицы. Однако они имеют главный недостаток, ограничивающий дальнейший рост частоты обновления информации в ОЭС – время накопления полезного сигнала соизмеримо или меньше времени считывания, в результате происходит искажение геометрической формы сигнала от звезды, что приводит к снижению помехозащищенности распознавания конфигурации звезд и уменьшению точности определения параметров ориентации КА.

Использование КМОП-матриц лишено этого недостатка и позволяет обеспечить непрерывное накопление полезного сигнала, что увеличивает эффективность использования поступающей энергии оптического излучения. В таких матрицах реализуются сверхвысокие скорости считывания, которые практически не влияют на шумовые характеристики изображения. Использование КМОП-матриц открывает несколько направлений для совершенствования приборов звездной ориентации.

Во-первых, можно использовать светосильные объективы, что позволяет получить значительное сокращение времени экспозиции.

Во-вторых, современные КМОП-матрицы имеют низкий уровень темнового шума, что дает увеличение отношения «сигнал/шум»:

$$\mu = \frac{N_{зв} \tau}{\sqrt{N_{зв} \tau + k^2 (N_{\phi} \tau + \sigma_{ш}^2)}}$$

где μ – отношение «сигнал-шум»;

$N_{зв}$ – поток фотоэлектронов от оптического излучения звезды;

t – время экспозиции;

k – число пикселей, на которые попало изображение звезды;

N_{ϕ} – поток термоэлектронов фона в пикселе;

$\sigma_{ш}$ – дисперсия шума считывания.

Предельная угловая скорость, при которой могут работать приборы звездной ориентации, зависит от трех параметров: углового размера пиксела, времени экспозиции и алгоритмов обработки информации [3]. Уменьшение углового размера пиксела и увеличение допустимой угловой скорости возможно только за счет уменьшения фокусного расстояния, при этом, чем меньше

линейный размер матрицы, тем меньше будет диапазон угловых скоростей и хуже все остальные параметры, кроме массы и габаритов прибора.

Возможность работы при высоких угловых ускорениях определяется точностью прогнозирования положения звезд и фрагментов вокруг них на следующем кадре. Очевидно, что точность прогнозирования тем выше, чем меньше время прогноза. Поэтому стремление к повышению частоты обновления информации до 10 Гц и выше обусловлено не только требованиями, исходящими от системы управления КА, но и необходимо с точки зрения повышения помехозащищенности прибора звездной ориентации. При этом возникает необходимость в разработке специальных алгоритмов обработки сигналов с матрицы.

Таким образом, звездный датчик должен обладать большой фотоприемной матрицей с числом элементов не менее 1024×1024 , обеспечивающей широкое поле зрения, и с маленьким пикселом, позволяющим достичь высокого углового разрешения. Кроме того, матрица должна иметь высокую квантовую чувствительность и большую потенциальную яму для накопления достаточного количества фотоэлектронов. Объектив должен быть дифракционного качества и иметь предельные характеристики в смысле углового разрешения и аберраций по всему полю зрения. Большое входное отверстие объектива обеспечивает накопление значительного количества энергии оптического излучения на коротких выдержках. Время накопления видеоинформации должно быть выбрано с учетом углового движения КА и особенностей работы затвора. Дальнейшее развитие конструкции приборов звездной ориентации требует создания компактной, однокаскадной бленды с большим коэффициентом подавления и уменьшения собственного шума фоточувствительных матриц до единиц фотоэлектронов.

Совместное использование информации ЗД и гироскопов характерно для многих систем управления КА. В отличие от ЗД, гироскопы функционируют в широком диапазоне угловых скоростей и независимо от внешних оптических условий. Однако при отсутствии коррекции по измерениям от других приборов, точность определения угловой скорости и параметров ориентации со временем, снижается. В настоящее время все чаще разрабатываются интегрированные приборы, в состав которых входят достаточно медленные ЗД и быстродействующие датчики угловой скорости [3]. Математическая обработка информации с обоих типов датчиков позволяет определять параметры ориентации и угловой

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

скорости с высокой точностью и частотой, необходимыми для работы системы управления движением КА. Поэтому в космическом приборостроении наблюдается тенденция к комплексированию функционально близких приборов. Создаются приборы, сочетающий звездный датчик и гироскоп. Эта связь двух приборов удачно взаимно дополняет их, увеличивая надежность выполнения задачи определения параметров ориентации КА.

Создание интегрированного прибора, сочетающего звездный датчик ориентации и датчики угловой скорости [4], предполагает разработку специального математического обеспечения и канала обмена информацией между ними.

За счет интеграции датчиков улучшаются такие параметры системы ориентации КА, как масса, габариты, энергопотребление, точность измерений и помехозащищенность, снижается стоимость. Интегрирование приборов определения ориентации ведет к уменьшению числа сборочных единиц на борту КА, сокращению кооперации изготовителей, увеличению помехозащищенности прибора, упрощению процессов сборки и испытаний готового изделия, уменьшению удельной стоимости составляющих единиц.

Наиболее динамично развиваются ОЭС КА с высоким и сверхвысоким пространственным разрешением. На протяжении нескольких лет на орбиту выводятся КА с ОЭС с разрешением до 10 м, что доказывает необходимость съемочных систем данного уровня детальности. В то же время количество ОЭС КА с высоким пространственным разрешением превышает количество КА с системами сверхвысокого разрешения. Это объясняется очень высокой стоимостью проектирования и создания такого рода систем на данном этапе технологического прогресса, поэтому в настоящее время предпочтение отдается ОЭС КА с высоким пространственным разрешением, которые имеют наилучшее соотношение цена/качество.

Одним из важных аспектов совершенствования ОЭС КА является минимизация ЦА и КА в целом, что позволяет получить экономическую выгоду без потери качества решения целевой задачи и при этом повысить оперативность развешивания орбитальной группировки КА.

Анализируя международный и отечественный опыт создания ОЭС для КА, можно выделить несколько ключевых технологий, позволяющих минимизировать массово-габаритные характеристики ЦА высокого разрешения:

- современные компактные оптические схемы (схема Корша, внеосевые схемы, схемы с асферическими элементами и др.);

- высокоэффективные конструкционные материалы (карбид кремния, углепластики, инвар и др.);

- современные материалы для оптических элементов (ситалл, zerodur, современные сорта оптических стекол);

- высокоскоростные ПЗС фотоприемники с временной задержкой с накоплением;

- фотоприемники большой размерности с малым размером элемента дискретизации (пикселя), но высокой чувствительностью.

Заключение

За последние 10 лет не произошло событий, способных радикально изменить подход к построению ОЭС. Так, например, для наблюдения звезд необходимость ухода из видимой и ближней ИК-областей спектра в какой-либо иной спектральный диапазон отсутствует. Это значит, что подход к выбору оптики ЭС пока остается неизменным. В то же время появились новые, более эффективные, чем ПЗС-матрицы, фотоприемные устройства, основанные на КМОП-технологии, получили дальнейшее развитие программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС), высокопроизводительные микропроцессоры, а так же миниатюрные датчики угловых скоростей на основе микроэлектромеханики.

Таким образом, можно сделать вывод, что:

- большинство современных систем ориентации и навигации космических средств составляет последнее поколение 3Д автономной астроориентации на основе ПЗС-матриц;

- дальнейшее развитие существующих ОЭС, основывается на улучшении их эксплуатационных характеристик путем совершенствования схемных решений, программно-математического обеспечения и замены отдельных электронных компонентов на более современные.

- модернизация используемых в настоящее время 3Д планируется за счет использования чувствительных сенсоров с активными пикселями, которые значительно более радиационно-стойкие, энергосберегающие, компактные и дешевые;

- значительное внимание уделяется комплексированию функционально близких приборов и интегрированию источников первичной информации;

- важное место в создании перспективных систем ориентации в космическом пространстве отводится разработке быстродействующих алгоритмов определения ориентации КА с использованием методов идентификации сегментов звездного неба;

- при конструировании перспективных АД

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

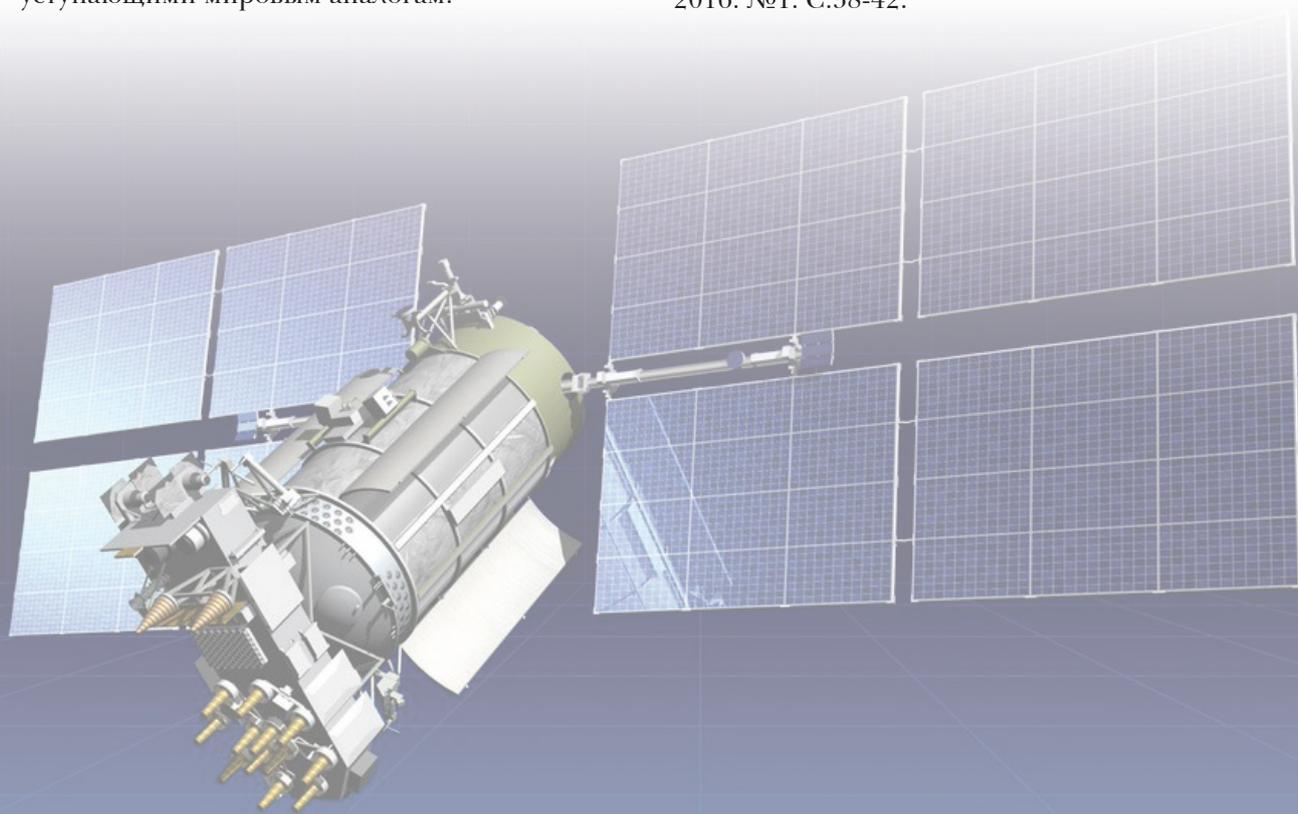
ориентации предполагается использовать блочно-модульную архитектуру, что позволит создавать как моноблочные компоновки приборов, так и использовать разное число оптических головок в сочетании с резервированными блоками обработки данных;

● при проектировании перспективных ОЭС необходимо обеспечить увеличение частоты кадров, диапазона аналого-цифрового преобразования до 15 бит и более, совершенствование элементной базы, в результате чего получить меньшие массово-габаритные характеристики целевой аппаратуры.

Используя научно-технический задел, созданный в рамках ранее проведенных опытно-конструкторских работ, инновационный потенциал [5], а также результаты полученные ведущими научно-исследовательскими организациями Российской академии наук, Министерства обороны и промышленности, совместно с соисполнителями, будут успешно решены вышеперечисленные научно-технические проблемы, что позволит создать комплекс оптико-электронных средств различного назначения и базирования с тактико-техническими характеристиками, не уступающими мировым аналогам.

Литература

1. Аванесов Г.А., Красиков В.А., Никитин А.В. Оценка точности прибора БОКЗ-М по результатам наземных и летных испытаний. Анализ синхронной работы двух приборов // Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов. Таруса, 2008. С.44-45.
2. Бортовые системы управления космическими аппаратами. Учебное пособие / Бровкин А.Г., Бурдыгов Б.Г., Гордийко С.В. и др. Под редакцией А.С.Сырова. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. 304 с.: ил.
3. Дятлов С.А., Бессонов Р.В. Обзор звездных датчиков ориентации космических аппаратов // Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов. Таруса, 2008. С.11-31.
4. Федосеев В.И., Герасимов С.А., Абакумов В.М., Исаков А.Н. Новые звездные приборы // Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов. Таруса, 2008. С.12-13.
5. Комбаров М.С. Направления инновационного развития современного высокотехнологичного предприятия на примере АО «Швабе – Оборона и Защита» // Национальная ассоциация ученых, 2016. №1. С.38-42.



ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК: 006.91; 006.922; 001.891.53; 524.82; 52.08; 530.1

О ВОЗНИКАЮЩЕЙ ПЕРСПЕКТИВЕ ПЕРЕОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ СЕКУНДЫ И ДЛИНЫ МЕТРА

ON THE EMERGING PERSPECTIVE OF OVERRIDING THE DURATION OF A SECOND AND THE LENGTH OF A METER

Валерий Александрович Коломбет
кандидат физико-математических наук
заведующий лабораторией
Институт теоретической и
экспериментальной биофизики РАН
Адрес: 142290, Московская обл.,
г. Пущино, ул. Институтская, д. 3
Тел.: +7(4967)73-94-64
E-mail: kolombet@iteb.ru

Вадим Николаевич Лесных
младший научный сотрудник
Институт теоретической и
экспериментальной биофизики РАН
Адрес: 142290, Московская обл.,
г. Пущино, ул. Институтская, д. 3
Тел.: +7(4967)73-94-64
E-mail: 1253vadim@mail.ru

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

Аннотация

Статья посвящена проблемам современной метрологии. Обнаружение т.н. универсальной системы утраивающихся периодов (УСУП) ведет к перспективе переопределения длительности секунды и длины метра на основе этого фундаментального физического явления.

Ключевые слова: утроение периода, универсальная система утраивающихся периодов, длительность секунды, длина метра, фундаментальные константы, фундаментальные явления.

Summary

The article is devoted to the problems of modern metrology. Detection of so-called. the universal system of tripling periods (USUP) leads to the prospect of redefining the duration of a second and the length of a meter based on this fundamental physical phenomenon.

Keywords: period tripling, universal system of treating periods, duration of a second, meter length, fundamental constants, fundamental phenomena.

Одним из многообразных следствий изучения т.н. универсальной системы утраивающихся периодов (УСУП) оказывается вывод о перспективе переопределения длительности секунды. Секунда до сих пор входит в список антропоморфных физических величин; исходно она определялась как промежуток времени между ударами сердца человека. Отсюда происходит наименование единицы частоты: 1 герц назван в честь немецкого ученого-физика XIX века Генриха Герца и прямо указывает на сердце (*Herz* – нем.) человека: один удар сердца происходит приблизительно в одну секунду. Современная секунда (т.н. секунда СИ) – это время, равное 9192631770 периодам излучения, вызываемого переходом между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133, находящегося в покое при температуре 0°К. Таким

образом, время измеряется длительностью периода довольно произвольно выбранного периодического процесса. Искусственность этого определения очевидна.

«...Эволюция физической картины мира – это переход от физики без фундаментальных постоянных (классическая физика) к физике с фундаментальными постоянными (современная физика)» [1]. Отсюда прямо следует перспективность переопределения понятия секунды на основе фундаментальных констант или тесно связанных с ними фундаментальных явлений.

Возникшая перспектива переопределения секунды была осознана после обнаружения [1, 2] и исследования [3-22] УСУП – системы особенных периодов, простирающейся почти через все масштабы времени – от окрестности планковского масштаба 10^{-43} сек до окрестности космо-

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

гического, то есть, до миллиардов лет. Компактное представление об УСУП можно получить из *рисунка 1*, где важный фрагмент УСУП представлен в форме т.н. страты.

Практически вся УСУП может быть в легко обозримом виде представлена в форме стопки из ~ 128 аналогичных страт. Эта стопка при $k \approx -110 \div +15$ заполняет весь промежуток периодов между планковским и космологическим масштабами времени. Вид всех страт (т.е. структура резонансов в них) практически одинаков, отличаются страты численными значениями центров страт: ..., $1.037/3^2$ сек, $1.037/3$ сек, 1.037 сек, $1.037 \cdot 3$ сек, $1.037 \cdot 3^2$ сек, ...

Общепринятое значение длительности секунды – 1 сек СИ – находится вблизи центра страты, который на *рисунке 1* занимает позицию 1.037 секунд СИ, то есть находится выше положения, соответствующего одной секунде СИ. В логарифмическом масштабе вертикальной оси, использованном на *рисунке 1*, это отличие 1.000 сек от 1.037 сек смотрится достаточно значимым. Ясно, что если переопределить секунду, удлинив ее величину до 1.037 секунд СИ, то ось абсцисс пройдет на уровне 1.037 сек, и *рисунке 1* упростится, а результаты измерения времени станут согласованными с существованием универсальной системы утраивающихся периодов и будут базироваться на ней. Ввиду фундаментальности

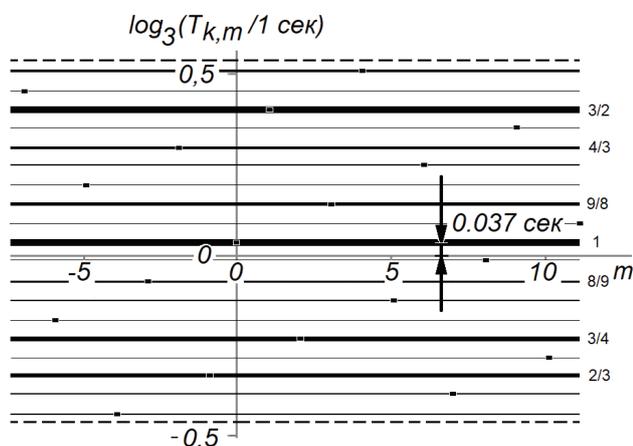


Рис. 1. Частная страта УСУП, определенная в окрестности одной секунды СИ. Это серия расположенных вдоль вертикальной оси особенных периодов $T_{k,m}$, объединенных т.н. формулой Петца $T_{k,m} = T_0 \times 3k/2m$ лет. Горизонтальная ось (ось параметра m) введена, в частности, для того, чтобы толщиной горизонтальных линий показать важность соответствующих периодов. Эти периоды являются резонансами $31/21, 21/31, 31/22, 22/31, 32/23, 23/32$ и т.д. по отношению к центральному ($m=0$) периоду этой страты. Для данной страты ($k=-20$) этот период близок к 1.037 секунды СИ. Точки на горизонтальных линиях указывают на значения параметра m , связанные с каждым из резонансов

УСУП новая секунда окажется определенной на базе фундаментального физического явления. Кстати, эталоном для пульса человека окажется уже не 60 ударов в минуту СИ, а 58 ударов в переопределенную минуту. Пульс человека от этого переопределения меры времени, конечно же, не изменит свою частоту.

Эмпирическое значение периода T_0 в формуле, определяющей $T_{k,m}$, получено в итоге сопоставления множества экспериментальных данных [1-5]. Это 15-значное число $114,572218767559$ лет. Достоверность столь высокой точности этого числа обусловлена процедурой подгонки к записям геологических и других естественных периодических процессов, содержащим иногда тысячу последовательных волн [2].

Процедура вычисления количества секунд СИ в T_0 включает в себя использование значения длительности года. Определение, принятое совместно Международным союзом теоретической и прикладной химии и Международным союзом геологических наук, рекомендует для длительности года использовать значение 31556925.445 секунды. Этого достаточно для уточнения значения переопределенной секунды. Произведение T_0 и длительности года равно $3615546965.72(6)$. Это безразмерное число означает количество секунд СИ в периоде T_0 – в значении периода при $T_{k,m} = T_{0,0}$, т.е. в центре (а значит, $m=0$) нулевой (при $k=0$) страты УСУП. Длительность переопределенной секунды (близкого к секунде СИ значения периода в центре минус 20-й страты (см. *рисунок 1*) составляет $3615546965.72(6)/3^{20}$, т.е. $1.036928742907(16)$ секунд СИ. Числа в круглых скобках означают погрешность последних значащих цифр приведенных высокоточных значений. Хотя высокая точность значения финального числа $1.036928742907(16)$ опирается на высокую точность экспериментального определения T_0 , она ограничена точностью определения длительности года.

В настоящий момент необходимость переопределений длительности секунды пока еще толком не осознается. Тем не менее, концепция уже сформулирована, и ее значимость будет возрастать по мере выяснения того, насколько, оказывается, глубоко и широко универсальная система утраивающихся периодов встроена во всевозможные физические, астрономические, геологические, биологические, технические и прочие периодические процессы, а также в связанные с ними явления. Настройка на УСУП обещает привести к прогрессу во многих областях человеческой деятельности. В грубой и неосознаваемой форме она существует уже сейчас, достаточно, например, обратить внимание на маловероятную

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

малость величины (3,7%) рассогласования значений секунды СИ и переопределенной секунды.

Предлагаемое переопределение секунды ведет к переопределению длины метра. Согласно современному (действующему с 1983 года) определению метра СИ – это длина пути, пройденного светом в вакууме за $1/299792458$ долю секунды СИ. Переопределенный метр будет выражаться через расстояние, которое пройдет свет в вакууме за одну переопределенную секунду, то есть в определении метра войдет неизменная скорость света и значение переопределенной секунды. Количество переопределенных метров, пройденных светом в вакууме за одну переопределенную секунду, по-прежнему равно количеству метров СИ, пройденных за одну секунду СИ – как и частота пульса человека, скорость света остается неизменной при переопределении секунды. А вот переопределенный метр окажется, как и секунда, в $1.036928742907(16)$ раз длиннее. Традиционный метр удлинится почти на 3,7 см.

Литература

1. https://ru.wikipedia.org/wiki/Фундаментальные_физические_постоянные.
2. S.J. Puetz. 2009. The United Cycle Theory: How Cycles Dominate the Structure of the Universe and Influence Life on Earth. Published February 11th 2009 by Outskirts Press. 496 P. (ISBN13: 9781432712167).
3. S.J. Puetz, A. Prokoph, G. Borchard, E. W. Mason. Evidence of synchronous, decadal to billion year cycles in geological, genetic, and astronomical events. *Chaos, Solution & Fractals* 62-63 (2014) 55-75.
4. A Prokoph, S.J. Puetz. Period-tripling and fractal features in multi-billion year geological records. *Mathematical geosciences*. 2015. 47 (5), 501-520.
5. Stephen J. Puetz, Andreas Prokoph, Glenn Borchardt. Evaluating alternatives to the Milankovitch theory. *Journal of Statistical Planning and Inference*. 2015. V. 170. P. 158-165.
6. Stephen J. Puetz, Glenn Borchardt. Quasi-periodic fractal patterns in geomagnetic reversals, geological activity, and astronomical events. *Chaos, Solution & Fractals* 81. P. 246-270.
7. Бондарь А.Т., Федоров М.В., Коломбет В.А. Утраивающиеся периоды в мультимасштабных физических и биологических явлениях // *Биофизика*, 2015. Т.60(6). С.1208-1215.
8. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В., Федоров М.В. Обнаружение в технических устройствах фрактальной системы утраивающихся периодов, известной по своим физическим, геофизическим, биофизическим и биологическим манифестациям // *Биофизика*, 2016. Т.61(3). С.615-624.
9. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В. О перспективе применения фундаментальной системы утраивающихся периодов в мультимасштабных технических устройствах // *Известия Института инженерной физики*, 2016. №1(39). С.8-11.
10. В.А. Коломбет, В.Н. Лесных, Е.В. Коломбет. Предсказание тактовой частоты процессора будущего поколения компьютеров как пример эффективности использования в технике свойств фрактальной системы утраивающихся периодов. *Известия Института инженерной физики*. 2016. №2(40). С.55-58.
11. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В. Особенности проявления фрактальной системы утраивающихся периодов в телевидении и мобильной телефонии // *Известия Института инженерной физики*, 2016. №4(42). С.20-24.
12. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Скавуляк А.Н., Коломбет Е.В., Бондарь А.Т. Проявление универсальной системы утраивающихся периодов в УВЧ-терапии // *Известия Института инженерной физики*, 2017. №2(44). С.70-73.
13. Коломбет В.А. Лесных В.Н., Коломбет Е.В. Учет существования сети Пиза как новый путь к повышению эффективности распознавания целей // *Известия Института инженерной физики*, 2017. №3(45). С.37-39.
14. Коломбет В.А. Лесных В.Н., Коломбет Е.В. Определение перспективных частот РЛС // *Известия Института инженерной физики*. 2017. №4(46). С.18-21.
15. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Бондарь А.Т. Треугольник Серпинского как удобная математическая модель для описания универсальной системы утраивающихся периодов // *Известия Института инженерной физики*, 2018. №1(47). С.63-68.
16. Коломбет В.А., Архипов В.Ю., Елистратов А.В., Лесных В.Н., Коломбет Е.В., Серая О.Ю. Стохастика и мутации в универсальной системе утраивающихся периодов // *Известия Института инженерной физики*, 2018. №2(48). С.56-62.
17. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В. Универсальная система утраивающихся периодов и музыкальный строй // *Известия Института инженерной физики*, 2018. №3(49). С.88-90.
18. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Станкевич А.А., Milian-Sanchez V. Наблюдение «музыки сфер» во всей области, заключенной между планковским и космологическим масштабами времени / В сб.: Система планета Земля. Изд. МГУ. С.146-161.
19. Коломбет В.А. Обнаружение частот Пиза в когнитивных процессах. Материалы Всероссийской конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях» (25-29 сентября 2017 года). С.126-128.
20. Коломбет В.А., Лесных В.Н. Универсальная система утраивающихся периодов как возможный индикатор дробления времени, сопровождающего эволюцию Вселенной. Материалы конференции «Физика пространства-времени». Муром, Премиловы горы, 23-28 марта 2017 г. С.17-20.
21. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В. Новые перспективы приложений универсальной системы утраивающихся периодов // *Известия Института инженерной физики*, 2018. №4(50). С.62-66.
22. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Елистратов А.В. О возможной природе осцилляций, приводящих к универсальной системе утраивающихся периодов // *Известия Института инженерной физики*, 2019. №1(51). С. 55-57.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 44.29.29

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ С КЛАССИФИКАЦИЕЙ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ В НЕЧЕТКОЙ ЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

MATHEMATICAL MODEL OF DIAGNOSING AN OBJECT OF ELECTRIC POWER EQUIPMENT WITH THE CLASSIFICATION OF THE TECHNICAL STATE IN A FUZZY LOGIC SYSTEM

Сергей Алексеевич Коннов

преподаватель кафедры
«Электроснабжения ракетных комплексов»
ВА РВСН имени Петра Великого
Адрес: 143900, Московская обл.,
г. Балашиха, ул. Карбышева, д. 8
Тел.: 8 (495) 524-02-61
E-mail: konnov82@mail.ru

Аннотация

Представлены различия классической структуры компонентов экспертной системы диагностирования и структуры системы нечеткого вывода, рассмотрены преимущества использования нечеткого подхода к решению задачи диагностирования технического состояния объектов электроэнергетического оборудования, выполнен подход к решению задачи классификации технического состояния объекта с помощью математической модели классификации технического состояния, сформулирован разработанный алгоритм классификации технического состояния объекта электроэнергетического оборудования, используемый в диагностической нечеткой системе.

Ключевые слова: экспертная система диагностирования, техническая диагностика, математическая модель, нечеткая логика, нечеткая классификация технического состояния.

Summary

Distinctions of classical structure of components of expert system of diagnosing and the structure of the system of odd conclusion are presented, advantages of use of indistinct approach to the problem solving of diagnosing of condition of objects of electrical power equipment considered, approach to the problem solving of classification of technical object with the aid of mathematical model of classification of condition is performed, algorithm of classification of condition of the object used in diagnostic indistinct system formulated.

Keywords: expert system of diagnosing, technical diagnostics, mathematical model, indistinct logic, indistinct classification of condition.

Одним из направлений, определяющих современное развитие информационных технологий контроля и диагностики технического состояния электроэнергетического оборудования (ЭЭО), можно считать интеллектуализацию процессов обработки диагностической информации с использованием технологии экспертных систем, которые способны более объективно оценивать техническое состояние объекта ЭЭО и обоснованнее принимать решения по управлению ремонтом оборудования.

В настоящее время при эксплуатации сложных технических систем (СТС) применяется календарный принцип обслуживания ЭЭО, который имеет ряд недостатков как технологическо-

го, так и экономического характера [1].

Подход, позволяющий в значительной степени избавиться от этих недостатков, основан на организации обслуживания ЭЭО по фактическому техническому состоянию (ФТС) [2].

Учитывая, что задачей любой диагностической экспертной системы является отнесение объекта к одному из ранее выделенных классов, то понимание и обсуждение постановок задач в такой области осложняется использованием одного и того же термина в разных смыслах.

Рассмотрим термин «классификация» технического состояния объекта ЭЭО, которым обозначают, по крайней мере, три разные сущности. Во-первых, процедуру построения классифика-

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

ции (и выделение классов, используемых при диагностике). Во-вторых, построенную классификацию – систему выделенных классов. В-третьих, процедуру ее использования – правила отнесения вновь поступающего объекта к одному из ранее выделенных классов. Имеем триаду: построение – изучение – использование классификации. Диагностика в узком смысле слова – процедура использования классификации [3].

Проблемы диагностики технических объектов, которые в широком плане можно рассматривать как проблемы анализа сложных систем, занимают все большее место в современной науке. В общем случае, цель диагностирования заключается в том, чтобы на основе анализа текущего состояния диагностируемого объекта ЭЭО определить значения выходных переменных, реализация которых позволяет обеспечить желаемое поведение или состояние неисправного объекта ЭЭО.

Классическая теория диагностики основывается на представлении объекта или процесса в форме некоторых систем (рисунк 1).



Рис. 1. Структурная схема процесса диагностирования

При этом объект диагностики характеризуется некоторым множеством входных параметров и некоторым множеством выходных параметров. На вход системы диагностики поступают некоторые входные переменные, которые могут быть сформированы с помощью конечного множества признаков. На выходе с использованием некоторого диагностического алгоритма поиска неисправностей в заданном пространстве диагностических признаков формируется множество значений выходных переменных. Их значения могут быть использованы для формирования конечного диагноза и выработки дальнейшей тактики по исправлению ситуации.

Также одним из главных вопросов разработки экспертной системы технической диагностики (ЭСТД) объекта ЭЭО является выбор математических моделей и методов классификации ситуаций, составляющих основу ее функционирования. Принятие решения по постановке диагноза любого объекта связано со сложностью системы, распределенностью ее подсистем, не-

определенностью текущего состояния объекта, необходимостью учитывать большое число различных факторов и критериев, характеризующих варианты решений. Поэтому при разработке ЭСТД возникает проблема выбора адекватных математических методов, позволяющих отражать структуру сложной системы, для которой решается задача диагностики, оперировать субъективными оценками экспертов, принимать во внимание качественный (вербальный) характер оценки специалистами вариантов решения проблемы, учитывать неясность, неточность данных средствами нечеткой логики.

Когда входные признаки трудно четко определить, модель отказа можно реализовать с помощью метода, использующего нечеткую логику, как для формализации входных нечетких признаков, так и для установления причинно-следственных связей.

Таким образом, учитывая вышеизложенное, описание математической модели оценки технического состояния объекта ЭЭО можно представить в виде постановки задачи [1,4].

Пусть исследуется совокупность, представляющая собой конечное множество элементов

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n),$$

которое получило название вектора информативных признаков объекта классификации

которое получило название вектора информативных признаков объекта классификации

$$c_z \in C, z = \overline{1, k}.$$

Каждый из признаков количественно представляет собой некоторое свойство или характеристику элементов рассматриваемого объекта. Также в рассмотрение вводится конечное множество классов решений d_1, d_2, \dots, d_m .

Задача классификации объекта состоит в выполнении нечеткой импликации вида:

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n) \longrightarrow y \in (d_1, d_2, \dots, d_m)$$

Степень принадлежности объекта $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ классам d_j рассчитываются так:

$$\mu_{d_j}(X) = \bigcup_{p=1, k_j} (\omega_{j_p} * \bigcap_{i=1, n} [\mu_{j_p}(x_i)]), j = \overline{1, m} \quad (1)$$

где $\bigcup(\bigcap)$ – операции *s-нормы* (*t-нормы*), т.е. из множества реализации логических операций OR (AND), при этом реализация этих функций максимум и минимум соответственно;

$\omega_{j_p} \in [0; 1]$ – вес нечетких продукций для *j-класса* по *p-признакам* класса x_i объекта;

k_j – количество правил в базе правил для класса d_j .

Соответственно, в качестве решения Y^* выбирают класс с максимальной степенью принадлежности:

$$Y^* = \underset{\{d_1, d_2, \dots, d_m\}}{\text{Arg max}} (\mu_{d_1}(X), \mu_{d_2}(X), \dots, \mu_{d_m}(X)) \quad (2)$$

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

где Arg – агрегирование результатов нечеткого вывода по каждому правилу базы знаний, реализуемое операцией \vee (max) нечеткой дизъюнкции над степенями принадлежности в нечетком множестве X .

Архитектура нечеткой диагностики основана на замене классической системы диагностирования системой нечеткой диагностики, в качестве которой используются системы нечеткого вывода [5] (рисунок 2).

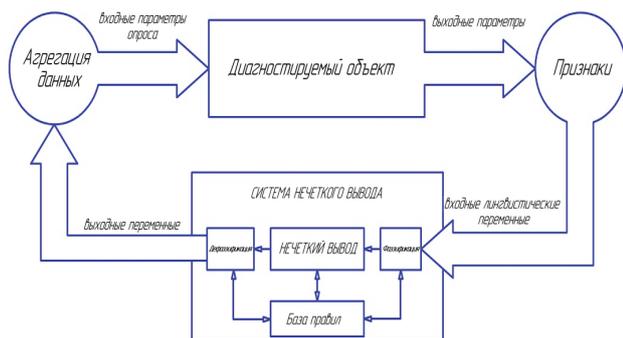


Рис. 2. Структурная схема процесса нечеткого моделирования

В этом случае модель нечеткой классификации технического состояния объекта ЭЭО строится с учетом необходимости реализации всех этапов нечеткого вывода и основывается на формальном представлении характеристик исследуемой системы в терминах лингвистических переменных. Поскольку кроме алгоритма классификации, основными понятиями здесь являются входные (признаки) и выходные (дефекты) переменные, то именно они рассматриваются как лингвистические переменные при формировании базы правил в нечеткой системе.

Сформулируем основные этапы метода нечеткой классификации объекта ЭЭО при определении класса технического состояния:

1. Определяют множество классов технических состояний d_1, d_2, \dots, d_m и множество $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ информативных признаков состояния объекта диагностирования нечеткие термы A_{ij} , где q – количество термов для лингвистической оценки признаков состояния x_i , и соответствующие им функции принадлежности; разрабатывают нечеткую базу знаний из r правил, построенную по иерархическому принципу [5, 6], с использованием которой выполняется оценка технического состояния:

$$\begin{aligned} &\text{Если } (x_1 = a_{1j}) \text{ and } (x_2 = a_{2j}) \text{ and } \dots \text{ and } (x_n = a_{nj}) \\ &\quad \text{с весом } \mu_j, \text{ тогда } y = d_j, \\ &\quad r = \overline{1, r} \end{aligned}$$

где r – количество правил;

d_j – значение консеквента j -го правила;

$\omega_{jp} \in [0; 1]$ – весовой коэффициент, задающий достоверность j -го правила;

a_{ij} – нечеткий терм, оценивающий признак x_i в j -ом правиле.

2. Для заданного фиксированного вектора значений входных переменных $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ определяют значение функции принадлежности нечетким термам входных переменных.

$$\mu^A(x_1, x_2, \dots, x_n) = \max_{j=1, r} \left\{ \omega_{jp} \left(\min_{p=1, q} [\mu^{a_p}(x_i)] \right) \right\} \quad (3)$$

3. Согласно соотношению (1) вычисляют функции принадлежности $\mu_{d_j}(X)$ термов-оценок выходных интегральных параметров состояния, соответствующих векторов значений входных параметров объекта диагностирования (x_1, x_2, \dots, x_n) .

4. Решение Y^* определяют как такое, для которого функция принадлежности максимальна согласно (2).

Проведенные исследования позволили определиться в достаточности выбранных диагностических параметров, а также разработать эффективный алгоритм многопараметрического диагностирования объекта ЭЭО (рисунок 3).

Выбор определенных диагностических параметров позволил перейти к разработке алгоритма классификации технического состояния, состоящего из совокупности проверок его диагностируемых параметров, а также правил, устанавливающих последовательность реализации элементарных проверок, и правил анализа результатов последних для поиска неисправностей.

Данный алгоритм в полном объеме позволяет классифицировать текущее техническое состояние системы и осуществлять поиск неисправностей по выбранным диагностическим параметрам.

В соответствии с алгоритмом осуществляется последовательная проверка каждого выбранного диагностического параметра системы на принадлежность к области допустимых значений, оценивая техническое состояние, отнести его в соответствии к одному из 4 классов: «Норма», «Норма с отклонениями (НСО)», «Норма со значительными отклонениями (НСЗО)», «Ухудшенное». При выявлении первых двух состояний, объект полностью работоспособен, и его можно эксплуатировать в штатном режиме. Если состояние объекта «НСЗО» или «Ухудшенное», то необходим контроль дополнительных параметрам.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

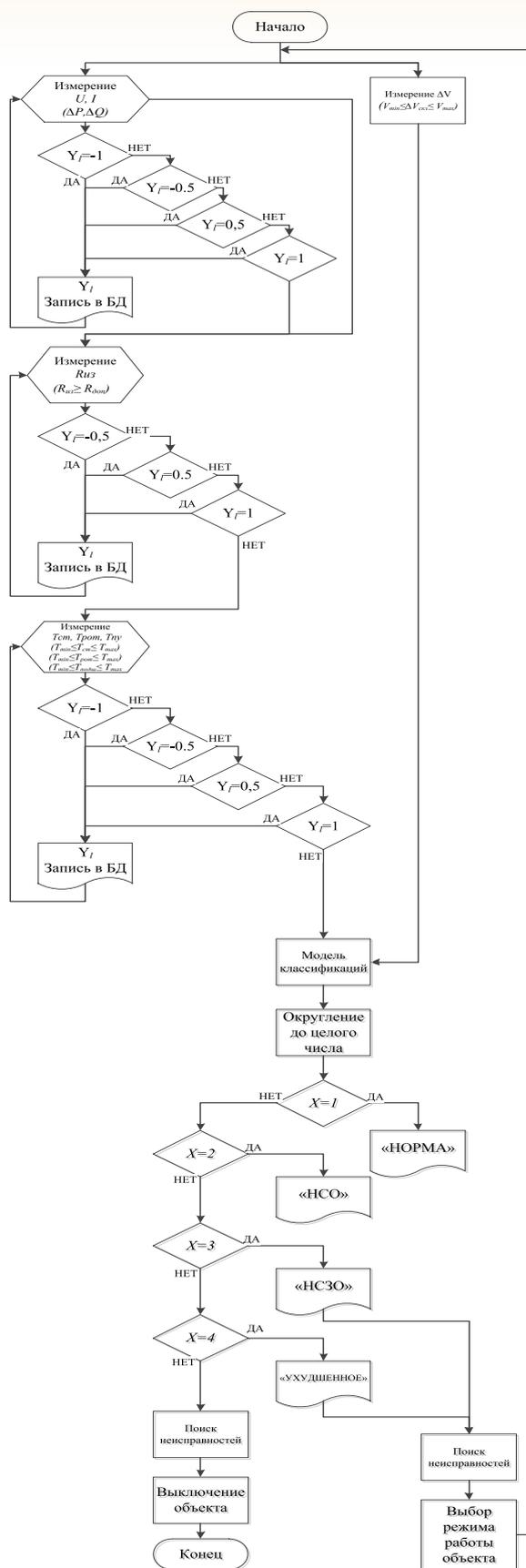


Рис. 3 Алгоритм классификации технического состояния объекта ЭЭС с использованием ЭСД

тров, поиск неисправностей и выбор облегченного режима эксплуатации. В случае предельного состояния выполняется поиск неисправностей и отключение объекта. Таким образом, процесс диагностирования технического состояния системы включает классификацию технического состояния и поиск неисправностей. То есть принцип действия данного алгоритма математически можно описать логической функцией, осуществляющей нечеткую импликацию контролируемых параметров с определением класса технического состояния с максимальной степенью принадлежности после агрегирования (объединения) логически сложных (дизъюнкция) степеней принадлежности.

Таким образом, техническая реализация комплексной диагностики ЭЭС в составе сложных технических систем с использованием МПК выливается в устройство встроенного контроля по фактическому состоянию, функционирующее как автономно, так и в составе системы в целом с последующим прогнозированием ее состояния, а предложенная схема нечеткой классификации позволяет по результатам диагностирования объекта ЭЭС с использованием определенного набора параметров состояния x_i и соответствующей базы знаний оценить техническое состояние объекта и отнести его к некоторому классу состояний (исправное или неисправное с дефектом определенного типа), определяемых по результатам диагностирования.

Литература

1. Капелько К.В., Коннов С.А. Модель комплексного диагностирования электроэнергетического оборудования сложных технических систем по фактическому состоянию // Известия Института инженерной физики, 2014. №3(33). С.51-53.
2. Емелин Н.М., Норенко А.Ю. Надежность и техническая диагностика сложных технических систем. М.: ВА РВСН имени Петра Великого, 2010. 295 с.
3. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzyTech. СПб.: БХВ-Петербург, 2003. 736 с.
4. Нурматова Е.В. Подход к решению задачи классификации технических состояний в нечеткой логической системе // Известия ТулГУ, 2010. С.170-174.
5. Нурматова Е.В. Архитектура системы нечеткого вывода, пример реализации // Вестник МГУПИ, 2004. 100 с.
6. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами Matlab. М.: Горячая линия-Телеком, 2007. 288 с.



УДК 621.391

ВЕРХНЯЯ АДДИТИВНАЯ ГРАНИЦА ВЕРОЯТНОСТИ ОШИБКИ В КАНАЛЕ СВЯЗИ С ПАМЯТЬЮ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОДИРОВАНИЯ И ПСЕВДОСЛУЧАЙНОГО ПЕРЕМЕЖЕНИЯ

A UNION BOUND ON ERROR PROBABILITY IN THE CHANNEL WITH MEMORY USING CODING AND PSEUDO-RANDOM INTERLEAVING

Вячеслав Анатольевич Шевченко

кандидат технических наук
начальник отдела – заместитель
начальника управления
Главное управление развития
информационных и телекоммуникационных
технологий МО РФ
Адрес: 119160, Москва, ул. Знаменка, д. 19
Тел.: +7 (916) 138-87-96
E-mail: shevv67@mail.ru

Аннотация

Рассмотрены каналы связи с кодированием и псевдослучайным перемежением в условиях группирования ошибок в пакеты переменной длины. Получена верхняя аддитивная граница вероятности ошибки для таких каналов.

Ключевые слова: вероятность ошибки, верхняя аддитивная граница, пакет ошибок, канал связи, метрика, кодирование, перемежение.

Summary

Communication channels with coding and pseudo-random interleaving under the conditions of grouping errors into packets of variable length are considered. Received union bound on error probability for such channels.

Keywords: error probability, union bound, package errors, channel, metric, coding, interleaving.

Для борьбы с импульсными помехами, наличием замираний наряду с кодированием применяется перемежение [1-3]. С целью исключения поражения периодической импульсной помехой соседние символы одной кодовой комбинации перемежаются не $m-1$ символом других кодовых комбинаций, а их случайным количеством [2]. При наличии ограничения на время доставки информации возможно возникновение в таких каналах связи группирования ошибок в пакеты (памяти).

Получить точные аналитические оценки вероятности ошибки на бит P_b для канала связи с группированием ошибок затруднительно. Традиционно для расчета вероятности ошибки на бит применяют асимптотически точную верхнюю аддитивную границу [1-4]. Метод построения такой верхней границы вероятности ошибки на бит для случая, когда ошибки в канале связи группируются в пакеты постоянной длины, разработан [5].

Однако для псевдослучайного перемежения

характерно группирование ошибок в пакеты переменной длины [6], в связи с чем метод [5] требует доработки.

Рассмотрим канал связи, в котором для передачи информации используется блочный (n, k) код, имеющий скорость $r=k/n$. Дистанционные свойства кода охарактеризуем коэффициентами $A_{w,d}$, которые представляют собой количество кодовых комбинаций весом d , порожденных входными информационными последовательностями весом w .

Обозначим переданную кодовую комбинацию через $x=(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Символы кода x_i , где i изменяется от 1 до n , могут принимать одно из целых чисел от 0 до $M-1$, где M – объем алфавита символов кода.

Далее кодовые символы записываются в матрицу, состоящую из n строк и m столбцов. Перед их считыванием построчно в канал связи в каждом столбце матрицы производится псевдослучайная перестановка кодовых символов.

После перемежения символу x_i модулятор ставит в соответствие сигнал $S_{x_i}(t)$. Объем ансамбля используемых сигналов $\{S_0(t), S_1(t), \dots, S_{M-1}(t)\}$ равен объему алфавита кодовых символов M .

На вход демодулятора поступает колебание, состоящее из полезного сигнала и теплового шума, имеющего спектральную плотность N_0 . Энергия сигнала, приходящаяся на бит информации, определяется величиной E_b . Кроме того, состояние канала связи подвержено периодическим статистическим изменениям.

Допустим, что в течение передачи B символов кода состояние канала связи не изменяется. Этот интервал соответствует передаче некоторого количества символов одной кодовой комбинации, которое определяет длину «пакета ошибок». Количество пакетов со средней длиной B/m не превышает $L = \lfloor nm/B \rfloor$, где m – глубина перемежения, $\lfloor x \rfloor$ – ближайшее меньшее целое к x . Для удобства анализа будем предполагать, что величина B кратна m . По краям кодовой комбинации размещается еще два пакета с длинами n_0 и n_{L+1} . Следовательно, комбинация из n символов разбивается на $L+2$ пакета с длинами $n_0, n_1, n_2, \dots, n_{L+1}$.

Пакету ошибок соответствует состояние канала связи, которое может определяться несколькими параметрами и быть векторным. Совокупность состояний канала связи e_j , где $j = \overline{0, L+1}$, в течение передачи кодовой комбинации образует вектор состояний $e = (e_0, e_1, e_2, \dots, e_L, e_{L+1})$.

В демодуляторе принятая канальная последовательность, состоящая из смеси сигнала, теплового шума и подверженная изменениям, обрабатывается в детекторах, соответствующих сигналам $S_0(t), S_1(t), \dots, S_{M-1}(t)$.

На выходе этих детекторов сигналов по окончании приема i -го символа кода формируется вектор $\mathbf{R}_i = (R_{0,i}, R_{1,i}, \dots, R_{M-1,i})$. Элементы вектора \mathbf{R}_i являются случайными величинами и имеют плотности распределения $p_{R_{k,i}}(r_{k,i}; \mathbf{e}_j | x_i)$, где $k = \overline{0, M-1}$, в зависимости от переданного символа x_i и того, какие значение принимает величина e_j .

Декодирование производится на основе решений демодулятора с использованием метрики $m(\mathbf{R}, \mathbf{x}; \mathbf{e})$, где $\mathbf{R} = (\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \dots, \mathbf{R}_n)$. Сложность декодера существенно упрощается, если метрика $m(\mathbf{R}, \mathbf{x}; \mathbf{e})$ обладает свойствами

аддитивности [1] и состоит из n слагаемых – метрик $m(\mathbf{R}_i, x_i; \mathbf{e}_i)$.

Под воздействием помехи и (или) теплового шума, а также из-за изменений состояния канала связи возможен выбор кодовой комбинации

$$\hat{\mathbf{x}} = (\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n) \in \mathcal{X}_d,$$

где \mathcal{X}_d – полное множество кодовых комбинаций с расстоянием Хэмминга d , вместо переданной $\mathbf{x} = \mathbf{x}_0$.

Образцом разбиения d символов кода, в которых принятая последовательность отличается от переданной, по $L+2$ пакетам является

$$\mathbf{d} = \{d_j\}_{j=0}^{L+1}, \quad d_j \leq n_j, \quad j = \overline{1, L+1}. \quad (1)$$

Величина d_j определяет вес j -го пакета ошибок.

Верхняя аддитивная граница имеет вид [4]

$$P_b \leq \sum_{d=d_{\min}}^n P_d(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}}), \quad (2)$$

где $P_d(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}})$ – вероятность трансформации кодовой последовательности \mathbf{x} в одну из последовательностей $\hat{\mathbf{x}} \in \mathcal{X}_d$.

Для случая ошибочного выбора i -ой кодовой комбинации \mathbf{x}_i

$$E_{\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_0} \triangleq (P(\mathbf{x}_i \in \mathcal{X}_d | \mathbf{x} = \mathbf{x}_0)). \quad (3)$$

Вероятность трансформации (ошибки) ограничена сверху [4]

$$P_d(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}}) \leq A_d P_d(E_{\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{x}}). \quad (4)$$

где

$$A_d = \sum_{w=1}^k \frac{w}{k} A_{w,d}. \quad (5)$$

Ошибка $E_{\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{x}}$ наступает, когда

$$m(\mathbf{R}, \hat{\mathbf{x}}; \mathbf{e}) \geq m(\mathbf{R}, \mathbf{x}; \mathbf{e}) \Leftrightarrow \sum_{i=1}^n m(\mathbf{R}_i, \hat{x}_i; \mathbf{e}_i) \geq \sum_{i=1}^n m(\mathbf{R}_i, x_i; \mathbf{e}_i) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \Omega_d(\mathbf{R}; \mathbf{e}) = \sum_{i=1}^n \Omega_1(\mathbf{R}_i; \mathbf{e}_i) \geq 0, \quad (6)$$

где $\Omega_1(\mathbf{R}_i; \mathbf{e}_i)$ – случайная величина, представляющая собой разность метрик принятого ошибочно и переданного символов кода

$$\Omega_1(\mathbf{R}_i; \mathbf{e}_i) = m(\mathbf{R}_i, \hat{x}_i; \mathbf{e}_i) - m(\mathbf{R}_i, x_i; \mathbf{e}_i). \quad (7)$$

В j -ом пакете величина $\Omega_1(\mathbf{R}_i; \mathbf{e}_i)$ при $\hat{x}_i \neq x_i$ отлична от нуля, а ее плотность распределения $p_{\Omega_1}(\omega_1; \mathbf{e}_j)$ зависит от состояния случайной величины e_j .

Количество ненулевых величин $\Omega_1(\mathbf{R}_i; \mathbf{e}_i)$ в j -ом пакете определяется его весом d_j .

Поставим в соответствие

$$\mathbf{R}_i = \mathbf{R}_k^{(j)}. \quad (8)$$

Тогда для варианта разбиения (1) условие возникновения ошибки $E_{\hat{x},x}$ (6) примет вид

$$\Omega_d(\mathbf{R}; \mathbf{e}) = \sum_{j=0}^{L+1} \sum_{k=1}^{d_j} \Omega_1(\mathbf{R}_k^{(j)}; \mathbf{e}_j) \geq 0. \quad (9)$$

Вероятность возникновения события (9), усредненная по возможным реализациям вектора состояний канала связи \mathbf{e} и вариантам разбиения \mathbf{d} , равна

$$P_d(E_{\hat{x},x}) = E_d \left(E_e \left(F_{\Omega_d}(\infty; \mathbf{e}, \mathbf{d}) - F_{\Omega_d}(0; \mathbf{e}, \mathbf{d}) \right) \right), \quad (10)$$

где $F_{\Omega_d}(x; \mathbf{e}, \mathbf{d})$ – функция распределения случайной величины Ω_d .

Воспользовавшись теоремой обращения [7]

$$F_{\Omega_d}(x) - F_{\Omega_d}(0) = \int_0^x p_{\Omega_d}(\omega_d) d\omega_d = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1 - \exp(-itx)}{it} \Phi_{\Omega_d}(t) dt, \quad (11)$$

где $\Phi_{\Omega_d}(t; \mathbf{e}, \mathbf{d})$ – характеристическая функция случайной величины Ω_d , и возможностью ее представления в виде произведения характеристических функций слагаемых в правой части выражения (9)

$$\Phi_{\Omega_d}(t; \mathbf{e}, \mathbf{d}) = \prod_{j=0}^{L+1} \Phi_{\Omega_1}^{d_j}(t; \mathbf{e}_j, \mathbf{d}), \quad (12)$$

получим

$$P_d(E_{\hat{x},x}) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{it} E_d \left(\prod_{j=0}^{L+1} D(t, d_j) \right) dt. \quad (13)$$

где

$$D(t, v) = E_{e_j} \left(\Phi_{\Omega_1}^v(t; \mathbf{e}_j) \right). \quad (14)$$

Когда определить правую часть выражения (13) затруднительно, принято использовать границу Чернова [1-3].

Граница Чернова вероятности ошибки $E_{\hat{x},x}$ при выполнении условия (9) примет вид

$$P_d(E_{\hat{x},x}) \leq \min_{s \geq 0} E_d \left(\prod_{j=0}^{L+1} E_{e_j} \left(\prod_{k=1}^{d_j} E_{\Omega_1} \left(\exp(s\Omega_1(\mathbf{R}_k^{(j)}; \mathbf{e}_j)) \right) \right) \right). \quad (15)$$

Для случайной величины $\Omega_1(\mathbf{Y}_i; \mathbf{e}_j)$, лежащей в пределах от ω_1^{\min} до ω_1^{\max} , величина $E_{\Omega_1} \left(\exp(s\Omega_1(\mathbf{R}_k^{(j)}; \mathbf{e}_j)) \right)$ в выражении (15) представляет производящую функцию моментов случайной величины Ω_j

$$E_{\Omega_1} \left(\exp(s\Omega_1(\mathbf{R}_k^{(j)}; \mathbf{e}_j)) \right) = \Phi_{\Omega_1}(s; \mathbf{e}_j) = \int_{\omega_1^{\min}}^{\omega_1^{\max}} \exp(s\omega_1) p_{\Omega_1}(\omega_1; \mathbf{e}_j) d\omega_1 \quad (16)$$

и связана с характеристической функцией

$$\Phi_{\Omega_1}(t = -is; \mathbf{e}_j).$$

С учетом изложенного, выражение (15) примет вид

$$P_d(E_{\hat{x},x}) \leq \min_{s \geq 0} E_d \left(\prod_{j=0}^{L+1} D(s = -it, d_j) \right). \quad (17)$$

Таким образом, как следует из выражений (13) и (17), верхняя аддитивная граница вероятности ошибки определяется произведением весовых функций $D(s, d_j)$, учитывающих вклад пакетов в соответствии с весом d_j . Весовая функция представляет усредненную по возможным реализациям состояния канала связи \mathbf{e}_j совокупность производящих функций моментов (либо связанных с ней характеристических функций) разности метрик принятых ошибочно и переданных символов кода, количество которых определяется весом пакета.

Порядок комбинирования весовых функций задается вероятностным распределением длин и весов пакетов ошибок.

Конкретизируем (17) для канала связи с группированием ошибок в пакеты переменной длины.

Известно [6] выражение для длины пакета n_i

$$n_i = \begin{cases} b_0 + \Theta_0, & i = 0, \\ b + \Theta_i - \Theta_{i-1}, & i = \overline{1, L}, \\ b_2 - \Theta_L, & i = L + 1. \end{cases} \quad (18)$$

где Θ_i – случайная величина, принимающая с вероятностью α значение 1 и с вероятностью $1-\alpha$ значение 0 , $b = B/m$, b_0, b_2 – длины пакетов ошибок, расположенных на краях кодовой комбинации, причем $b_2 = n - bL - b_0$.

Анализ выражения (18) показывает, что длина пакета ошибок является случайной марковской величиной, которая зависит от длины предыдущего пакета ошибок.

Отобразим указанную зависимость при помощи графа переходов, представленного на рисунке 1.

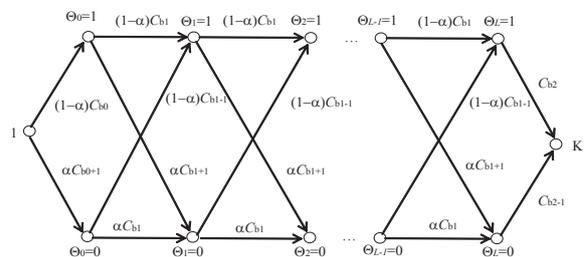


Рис. 1. Граф переходов

Узлы графа на рисунке 1 соответствуют возможным состояниям $\Theta_0, \Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_L$, а ребра – возможным переходам из состояния в состояние. Ребрам приписан вес C , имеющий в

качестве нижнего индекса длину пакета, возникающего при переходе, и в качестве множителя вероятность этого перехода.

Как видно из рисунка 1, группирование ошибок в пакеты переменной длины происходит при $0 < \alpha < 1$.

Используя стандартные правила преобразования направленных графов, получим производящую функцию распределения длин пакетов ошибок [6]

$$K = \mathbf{x} C^L \mathbf{y}^T \quad (19)$$

где T – знак транспонирования;

$$\mathbf{x} = \left((1-\alpha)C_{b_0-1}, \alpha C_{b_0} \right), \quad \mathbf{y} = \left(C_{b_2+1}, C_{b_2} \right), \quad (20)$$

$$C = \begin{pmatrix} (1-\alpha)C_b, & (1-\alpha)C_{b-1} \\ \alpha C_{b+1}, & \alpha C_b \end{pmatrix}. \quad (21)$$

При $\alpha=1/2$, когда группирование ошибок в пакеты переменной длины наиболее выражено,

$$C^L = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} \lambda_1^L + \lambda_2^L, & \sqrt{\frac{C_{b-1}}{C_{b+1}}} (\lambda_1^L - \lambda_2^L) \\ \sqrt{\frac{C_{b+1}}{C_{b-1}}} (\lambda_1^L - \lambda_2^L), & \lambda_1^L + \lambda_2^L \end{vmatrix}. \quad (22)$$

где

$$\lambda_{1,2} = \frac{C_b \pm \sqrt{C_{b+1} C_{b-1}}}{2}, \quad (23)$$

С учетом выражения (23) элементами матрицы C^L (22) для нечетных значений L являются

$$c_{11}^L = c_{22}^L = \frac{\lambda_1^L + \lambda_2^L}{2} = \frac{1}{2L} \sum_{i=0}^{L/2} C_L^{2i} (C_b)^{2i} (C_{b+1} C_{b-1})^{\frac{L-i}{2}}, \quad (24a)$$

$$c_{21}^L = \sqrt{\frac{C_{b+1}}{C_{b-1}}} (\lambda_1^L - \lambda_2^L) = \frac{1}{2L} C_{b+1} \sum_{i=0}^{L/2-1} C_L^{2i+1} (C_b)^{2i+1} (C_{b-1} C_{b+1})^{\frac{L-i}{2}}, \quad (24б)$$

$$c_{12}^L = \sqrt{\frac{C_{b-1}}{C_{b+1}}} (\lambda_1^L - \lambda_2^L) = \frac{1}{2L} C_{b-1} \sum_{i=0}^{L/2-1} C_L^{2i+1} (C_b)^{2i+1} (C_{b-1} C_{b+1})^{\frac{L-i}{2}}. \quad (24в)$$

Для нечетных значений L матрица CC^{L-1} , где C задается выражением (21) при $\alpha=1/2$, C^{L-1} – выражением (22), состоит из элементов

$$c_{11}^L = c_{22}^L = \frac{C_b (\lambda_1^{L-1} + \lambda_2^{L-1}) + \sqrt{C_{b-1} C_{b+1}} (\lambda_1^{L-1} - \lambda_2^{L-1})}{4}, \quad (25a)$$

$$c_{21}^L = \frac{1}{4} \left(C_{b+1} (\lambda_1^{L-1} + \lambda_2^{L-1}) + C_b \sqrt{\frac{C_{b+1}}{C_{b-1}}} (\lambda_1^{L-1} - \lambda_2^{L-1}) \right), \quad (25б)$$

$$c_{12}^L = \frac{1}{4} \left(C_{b-1} (\lambda_1^{L-1} + \lambda_2^{L-1}) + C_b \sqrt{\frac{C_{b-1}}{C_{b+1}}} (\lambda_1^{L-1} - \lambda_2^{L-1}) \right). \quad (25в)$$

Используя выражения (24), после некоторых математических преобразований выражений (25) найдем

$$c_{11}^L = c_{22}^L = \frac{1}{2L} \sum_{i=0}^{(L-1)/2} C_L^{2i+1} (C_b)^{2i+1} (C_{b+1} C_{b-1})^{\frac{L-1-i}{2}}, \quad (26a)$$

$$c_{21}^L = \frac{1}{2L} C_{b+1} \sum_{i=0}^{(L-1)/2} C_L^{2i} (C_b)^{2i} (C_{b-1} C_{b+1})^{\frac{L-1-i}{2}}, \quad (26б)$$

$$c_{12}^L = \frac{1}{2L} C_{b-1} \sum_{i=0}^{(L-1)/2} C_L^{2i} (C_b)^{2i} (C_{b-1} C_{b+1})^{\frac{L-1-i}{2}}. \quad (26в)$$

Выражение (19) для четных значений L с учетом того, что элементы матрицы C^L задаются выражением (24), примет следующий вид:

$$K_{even} = \frac{1}{2^{L+1}} (C_{b_0-1} C_{b_2} C_{b+1} + C_{b_0} C_{b_2+1} C_{b-1}) \sum_{i=0}^{L/2-1} C_L^{2i+1} (C_b)^{2i+1} (C_{b-1} C_{b+1})^{\frac{L-1-i}{2}} + \frac{1}{2^{L+1}} (C_{b_0} C_{b_2} + C_{b_0-1} C_{b_2+1}) \sum_{i=0}^{L/2} C_L^{2i} (C_b)^{2i} (C_{b+1} C_{b-1})^{\frac{L-i}{2}}. \quad (27a)$$

для нечетных значений L с учетом того, что элементы матрицы C^L задаются выражением (26), следующий:

$$K_{odd} = \frac{1}{2^{L+1}} (C_{b_0-1} C_{b_2} C_{b+1} + C_{b_0} C_{b_2+1} C_{b-1}) \sum_{i=0}^{(L-1)/2} C_L^{2i} (C_b)^{2i} (C_{b-1} C_{b+1})^{\frac{L-1-i}{2}} + \frac{1}{2^{L+1}} (C_{b_0} C_{b_2} + C_{b_0-1} C_{b_2+1}) \sum_{i=0}^{(L-1)/2} C_L^{2i+1} (C_b)^{2i+1} (C_{b+1} C_{b-1})^{\frac{L-1-i}{2}}. \quad (27б)$$

Анализ выражений (27) показывает, что максимальная длина пакета при $b > 1$ находится в пределах от $b-1$ до $b+1$, а основными оставляющими последовательности пакетов являются сочетания $C_b C_b$ и $C_{b-1} C_{b+1}$.

При этом возможны последовательности пакетов

$$C_{b_0-1} C_{b_2} C_{b+1}, C_{b_0} C_{b_2+1} C_{b-1}, C_{b_0} C_{b_2} C_b, C_{b_0-1} C_{b_2+1} C_b. \quad (28)$$

Для простоты анализа пакеты на краях кодовой комбинации будем считать как один с максимальной длиной

$$b_0 + b_1 = n - bL, \quad (29)$$

а последовательности (28) заменим последовательностью

$$C_{n-bL} C_b. \quad (30)$$

Тогда выражения (27) после некоторых математических преобразований примут вид

$$K_{even} = \frac{1}{2^L} \left(C_{n-bL} (C_{b-1} C_{b+1})^{\frac{L}{2}} + \sum_{i=1}^{L/2} (C_L^{2i} + C_L^{2i-1}) (C_b)^{2i} (C_{b-1} C_{b+1})^{\frac{L-i}{2}} \right) = \frac{1}{2^L} C_{n-bL} \sum_{i=0}^{L/2} C_L^{2i} (C_b)^{2i} (C_{b-1} C_{b+1})^{\frac{L-i}{2}}, \quad (31a)$$

$$K_{odd} = \frac{1}{2^L} C_{n-bL} C_b \sum_{i=0}^{(L-1)/2} (C_L^{2i} + C_L^{2i+1}) (C_b)^{2i} (C_{b+1} C_{b-1})^{\frac{L-1-i}{2}} = \frac{1}{2^L} C_{n-bL} C_b \sum_{i=0}^{(L-1)/2} C_L^{2i+1} (C_b)^{2i} (C_{b+1} C_{b-1})^{\frac{L-1-i}{2}}. \quad (31б)$$

Как следует из выражений (31), пакеты, в основном, являются сдвоенными и состоят либо из пакетов равной длины b , либо из пакетов с длинами $b-1$ и $b+1$.

Наличие указанных сдвоенных пакетов (блоков) позволяет воспользоваться результатами [5], полученными для случая группирования ошибок в пакеты постоянной длины.

Пусть имеется f_v блоков весом v в пределах от 0 до

$$w = \begin{cases} b, & b \leq d \\ d-l+1, & b > d \end{cases}, \quad (32)$$

где l – количество блоков с ненулевым весом, общим количеством F .

Распределение блоков различного веса $f = \{f_v\}_{v=0}^w$ должно удовлетворять условиям:

$$F = \sum_{v=0}^w f_v, \quad d = \sum_{v=1}^w v f_v. \quad (33)$$

Количество блоков с нулевым весом при любом распределении ошибочных символов при $d < L$ отлично от нуля. Игнорирование этих блоков делает возможным ограничить максимальное число пакетов F величиной

$$F = \min(d, P = \lfloor n/2b \rfloor). \quad (34)$$

Для канала связи с группированием ошибок в пакеты постоянной длины при сделанных допущениях справедливо [5]

$$P_d(E_{\hat{x},x}) \leq B_d(s), \quad (35)$$

где

$$B_d(s) = \frac{(2bF-d)!F!}{(2bF)!} \sum_{l=\lfloor d/2b \rfloor}^F \frac{A(d,l;\mathbf{g})}{(F-l)!}. \quad (36)$$

В выражении (36) $\mathbf{g} = (g_1, g_2, \dots, g_w)$ – формальные переменные, которые рассчитываются по формуле

$$g_v = D_2(s, v, 2b) \frac{2b!}{(2b-v)!}. \quad (37)$$

Определим весовую функцию D_2 .

Весовой функцией для пакетов длиной b_1 , $b_2 \geq b_1$ и весом w_1, w_2 является

$$D_2(s, w_1, w_2; b_1, b_2) = D(s, w_1) D(s, w_2). \quad (38)$$

Примем, что вес блока

$$w = w_1 + w_2. \quad (39)$$

Найдем $D_2(s, w; b_1, b_2)$ как усредненную весовую функцию (38) по возможным значениям w_2 при наличии ограничения (39) методом производящих функций. В разложении функции

$$f(t) = \left(\sum_{i=0}^{b_1} C_{b_1}^i D(s, i) t^i \right) \left(\sum_{i=0}^{b_2} C_{b_2}^i D(s, i) t^i \right) \quad (40)$$

по степеням фиктивного параметра t значение $D_2(s, w; b_1, b_2)$ определяет коэффициент при t в степени w .

Известно [8]

$$\left(\sum_{i=0}^{\infty} a_i t^i \right) \left(\sum_{i=0}^{\infty} b_i t^i \right) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n t^n, \quad (41)$$

где

$$c_n = \sum_{i=0}^n a_i b_{n-i}. \quad (42)$$

Для

$$a_i = \begin{cases} C_{b_1}^i D(s, i), & i = \overline{1, b_1} \\ 0, & i > b_1 \end{cases}, \quad b_i = \begin{cases} C_{b_2}^i D(s, i), & i = \overline{1, b_2} \\ 0, & i > b_2 \end{cases}, \quad (43)$$

из выражения (42) определим, что

$$D_2(s, w; b_1, b_2) = \frac{1}{C_{b_1+b_2}^w} \sum_{i=\max(0, w-b_2)}^{\min(w, b_1)} C_{b_1}^i C_{b_2}^{w-i} D(s, i) D(s, w-i). \quad (44)$$

Для блоков, состоящих из пакетов одинаковой длины b и содержащих v ошибочных символов, выражение (44) примет следующий вид:

$$D_2(s, v; b, b) = \frac{1}{C_{2b}^v} \sum_{i=\max(0, v-b)}^{\min(v, b)} C_b^i C_b^{v-i} D(s, i) D(s, v-i), \quad (45)$$

для блоков, состоящих из пакетов длиной $b-l$ и $b+l$, – следующий:

$$D_2(s, v; b-1, b+1) = \frac{1}{C_{2b}^v} \sum_{i=\max(0, v-b-1)}^{\min(v, b-1)} C_{b-1}^i C_{b+1}^{v-i} D(s, i) D(s, v-i). \quad (46)$$

В случае появления блоков из пакетов одинаковой длины с вероятностью $p_{b,b}$

$$D_2(s, v; 2b) = p_{b,b} D_2(s, v; b, b) + (1-p_{b,b}) D_2(s, v; b-1, b+1). \quad (47)$$

Подставив выражения (45) и (46) в выражение (47), получим после некоторых преобразований

$$D_2(s, v, 2b) = \frac{1}{C_{2b}^v} \left(\Delta D_2(s, v, 2b) + \sum_{i=\max(0, v-b)}^{\min(v, b-1)} (p_{b,b} C_b^i C_b^{v-i} + (1-p_{b,b}) C_{b-1}^i C_{b+1}^{v-i}) D(s, i) D(s, v-i) \right), \quad (48)$$

где

$$\Delta D_2(s, v, 2b) = \begin{cases} 0, & v < b, \\ p_{b,b} D(s, b), & v = b, \\ p_{b,b} b D(s, 1) D(s, b) + (1-p_{b,b}) D(s, b+1), & v = b+1, \\ p_{b,b} C_b^{v-b} D(s, v-b) D(s, b) + \\ + (1-p_{b,b}) C_{b-1}^{v-b-1} D(s, v-b-1) D(s, b+1), & v > b+1. \end{cases} \quad (49)$$

Выражение (31) показывает, что $p_{b,b} \approx 1/2$.

Наряду с P блоками имеется $P+1$ длиной $n-2bP \leq 2b$, когда длина кода n не делится на длину блока $2b$ без остатка.

Пусть в P блоках содержится $d-i$ ошибочных символов, в $P+1$ блоке – оставшиеся i . Вероятность этого события подчинена гипергеометрическому распределению

$$P(d-i, d, bL, n) = \frac{C_n^{d-i} C_n^i}{C_n^d}. \quad (50)$$

Тогда вместо выражения (35) запишем

$$P_d(E_{\hat{x},x}) \leq \begin{cases} B_d(s), & n = bP \\ \frac{C_n^{2bP}}{C_n^d} B_d(s) + \sum_{i=\min(1, d-2bP)}^{n-bP} \frac{C_n^{d-i} C_n^i}{C_n^d} D_2(s, i, n-bP) B_{d-i}(s), & n > bP \end{cases} \quad (51)$$

где $D_2(s, i, n - 2bP)$ – весовая функция $P+1$ блока.

В $P+1$ блоке ошибочные символы, общим количеством i , как следует из выражений (31), распределены по пакетам с длинами

$$n_0 = n - bL, \quad (52)$$

$$n_{2P+1} = n - 2bP - n_0 = bL - 2bP = \begin{cases} 0, & L - \text{четное} \\ b, & L - \text{нечетное} \end{cases} \quad (53)$$

Учитывая (44), (52) и (53), найдем, что

$$D_2(s, i, n - 2bP) = \begin{cases} D(s, i), & L - \text{четное} \\ \frac{1}{C_{b+n-2bL}^v} \sum_{k=\max(0, i-b)}^{\min(i, n-2bL)} C_{n-2bL}^k C_b^{i-k} D(s, k) D(s, i-k), & L - \text{нечетное} \end{cases} \quad (54)$$

Выражения (36), (34), (48), (54) позволяют оценить вероятность ошибки (51) в канале связи с группированием ошибок в пакеты переменной длины.

Воспользуемся полученными соотношениями для оценки воздействия «наихудшей» шумовой импульсной помехи, имеющей среднюю спектральную плотность N_j , на канал связи, в котором для декодирования используется метрика с «логарифмическим ограничением».

Под «наихудшей» будем понимать помеху, вероятность появления отдельного импульса ρ которой выбрана таким образом, чтобы максимизировать вероятность ошибки на бит (2).

Для указанного случая весовой функцией пакета ошибок является [9]

$$D(s, v) = (1 - \rho) \Phi_{\Omega_1}^v(s; e_j = z_j = 0) + \rho \Phi_{\Omega_1}^v(s; e_j = z_j = 1), \quad (55)$$

где

$$\Phi_{\Omega_1}(s; z_j) = \frac{\pi s}{\sin(\pi s)} \exp\left(-\frac{\gamma^2(z_j)}{2}\right) {}_1F_1\left(1-s; 1; \frac{\gamma^2(z_j)}{2}\right). \quad (56)$$

В выражении (56)

$$\gamma^2(z_j) = \left((rE_b \log_2 M / N_0)^{-1} + z_j (\rho r E_b \log_2 M / N_j)^{-1} \right)^{-1} \quad (57)$$

В качестве кодов рассмотрим двоичные расширенные БЧХ (8,1) и (64,10). Для первого кода примем, что $b=1$, для второго – $b=8$. Это обусловлено тем, что при ограничении времени на доставку информации с увеличением длины кода пропорционально возрастает память канала связи.

На *рисунке 2* представлены зависимости вероятности ошибки на бит P_b от отношения E_b/N_j в условиях воздействия импульсной шумовой помехи при группировании ошибок в пакеты постоянной (непрерывные линии) и переменной длины (штриховые линии).

Анализ графиков на *рисунке 2* показывает, что короткие коды менее действенны в каналах связи с пакетами ошибок переменной длины. С увеличением длины кода характер группирова-

ния ошибок практически не ощутим. Это объясняется тем, что с увеличением длины кода кодовое расстояние между комбинациями растет, а относительный разброс возможных длин пакетов от их среднего значения уменьшается.

Таким образом, получены аналитические выражения для верхней аддитивной границы вероятности ошибки в каналах связи с кодированием и перемежением при группировании ошибок в пакеты переменной длины.

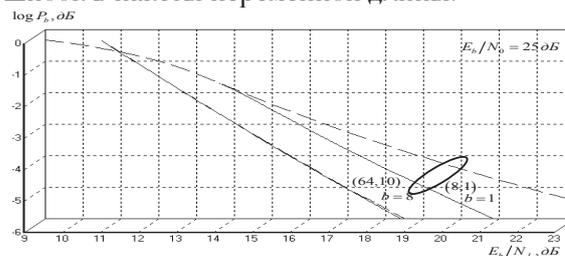


Рис. 2. Зависимость вероятности ошибки P_b от отношения E_b/N_j для расширенных кодов БЧХ в условиях воздействия шумовой импульсной помехи при группировании ошибок в пакеты постоянной и переменной длины

Литература

1. Simon M.K., Omura J.K., Scholtz R.A., Levitt B.K. Spread Spectrum Communications. vol.I-III, Rockville, MD: Computer Science, Maryland, 1985.
2. Кларк Дж., Кейн Дж. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1987. 392 с.
3. Zummo S.A, Stark W. E. A union bound on the error probability of binary codes over block-fading channels//IEEE Transactions on Communication., 2005. vol. 54, P. 2085-2093.
4. Divsalar D. A simple tight bound on error probability of block codes with application to turbo codes//The Telecommunications and Mission Operations Progress Report, ТМО PR 42-139. 1999. P. 1-35.
5. Шевченко В.А. Верхняя аддитивная граница вероятности ошибки на бит в канале с «жесткими» решениями в условиях воздействия случайной импульсной помехи // Известия Института инженерной физики, 2010. № 3 (17), С. 43-47.
6. Шевченко В.А. Модель группирования ошибок в пакеты переменной длины для каналов с кодированием и перемежением в условиях воздействия случайной импульсной помехи // Методы и устройства передачи и обработки информации, 2009. № 11. С.432-436.
7. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. Часть 1. Случайные процессы. М.: Издательство Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1976. 494 с.
8. Грандштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 1232 с.
9. Шевченко В.А. Верхняя аддитивная граница вероятности ошибки на бит для двоичных кодов в некогерентных каналах связи с метрикой с «объединением произведением» в присутствии случайной импульсной помехи и теплового шума // Известия Института инженерной физики, 2016. № 1 (39). С. 48-54.

УДК 519.725

МНОГОМЕРНЫЕ КАСКАДНЫЕ КОДЫ И АЛГОРИТМЫ ИТЕРАТИВНОГО ДЕКОДИРОВАНИЯ

MULTIDIMENSIONAL CASCADE CODES AND ALGORITHMS ITERATIVE DECODING

Владислав Валентинович Квашенников

доктор технических наук

ведущий научный сотрудник

АО «Калужский НИИ

телемеханических устройств»

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

Тел.: 8 (4842) 743-500

E-mail: kvashienvv@mail.ru

Аннотация

В работе предложены многомерные итеративные каскадные помехоустойчивые коды, построенные на основе наилучших известных коротких помехоустойчивых кодов и многомерных итеративных двоичных кодов. Описан алгоритм итеративного декодирования многомерного каскадного кода с коррекцией стираний, сложность которого возрастает примерно линейно с увеличением длины кода. Представлены оценки помехоустойчивости многомерного итеративного каскадного кода. Показано, что итеративное декодирование обеспечивает существенно большую вероятность правильного приема по сравнению с декодированием в пределах минимального кодового расстояния.

Ключевые слова: каскадные помехоустойчивые коды, алгоритмы кодирования и декодирования, минимальное кодовое расстояние, вероятность правильного приема кода.

Summary

In work the multidimensional iterative cascade noiseproof codes constructed on the basis of the best known short noiseproof codes and multidimensional iterative binary codes are offered. The algorithm of iterative decoding of a multidimensional cascade code with correction of the deletings which complexity increases linearly with increase in length of a code is described. Estimations of a noise stability of a multidimensional iterative cascade code are presented. It is shown, that iterative decoding design provides essentially a high probability of correct reception in comparison with decoding within the minimum code distance.

Keywords: cascade noiseproof codes, algorithms of coding and decoding, the minimum code distance, probability of correct reception of a code.

Введение

Хорошие помехоустойчивые коды должны быть достаточно длинными и допускать не слишком сложное мягкое декодирование. В настоящее время известны перспективные кодовые конструкции для передачи сообщений большого объема, составляющего сотни тысяч и более бит: турбо коды (ТК), коды с малой плотностью проверок на четность Галлагера (Low-Density Parity-Check codes – LDPC коды), полярные коды (ПК), помехоустойчивость которых приближается к границе Шеннона [1,2]. Коды допускают мягкое итеративное декодирование, обеспечивающее высокую помехоустойчивость. Вероятность ошибки на символ этих кодов убывает до сколь угодно малого значения с увеличением длины кода при скорости передачи близкой к пропускной способности канала. Однако, ТК обладают

сравнительно небольшим кодовым расстоянием, имеют относительно высокую сложность декодирования и большую задержку, что делает их неудобными для ряда практических приложений [3]. По этой причине в хороших каналах применяют не ТК, а LDPC коды. LDPC коды имеют минимальное расстояние, возрастающее линейно с увеличением длины кода при почти линейной сложности алгоритма декодирования [4]. Среди многообразия кодов, исправляющих ошибки, особое место занимают ПК, предложенные и рассмотренные Э. Ариканом [5]. В отличие от ТК и LDPC кодов, ПК можно использовать не только для передачи длинных, но и относительно коротких сообщений, которые используются, например, в системах телекодирования управления. Основной идеей ПК является поляризация канала связи с введением стираний

наименее достоверных символов. Доказано, что ПК способны в каналах с гауссовским шумом достигать пропускной способности двоичных симметричных каналов (ДСК) без памяти. По этой причине наблюдается значительное увеличение внимания к ПК и алгоритмам итеративного декодирования в стирающем канале связи.

Перечисленные перспективные коды имеют важное теоретическое и практическое значение и используются в системах спутниковой связи, ряде стандартов цифрового телевидения и мобильных системах связи, во многих новых стандартах передачи данных (DVB-S2, 802.11n, 802.16e) и др. [6].

Концепция многомерного каскадного кода

В настоящей работе предложен многомерный итеративный каскадный помехоустойчивый код, который может использоваться для передачи сообщений различной длины, начиная с небольших длин в несколько десятков бит и заканчивая длинами в несколько Мбит и более. Сообщения передают каскадным кодом, внешним кодом которого является наилучший известный короткий код, а внутренним – многомерный итеративный код. Многомерный итеративный код предложен в середине прошлого века П. Элайесом. Для этой конструкции линейного кода средняя вероятность ошибки на символ убывает до сколь угодно малого значения при увеличении длины кода при скорости передачи меньше пропускной способности канала связи [7]. За счет согласованного увеличения числа измерений многомерного кода и длины измерения в пределе обеспечивается постоянная скорость кода больше некоторой положительной величины.

В отличие от традиционного подхода, при котором многомерный итеративный код Элайеса строится над канальными символами, символами данного итеративного кода предлагается использовать внешние линейные коды. Поскольку поразрядная сумма по модулю два линейных кодов также является линейным кодом, то проверочными символами многомерного итеративного кода являются внешние линейные коды. В канале связи передают информационные и проверочные символы многомерного итеративного кода, которые являются внешними линейными кодами. Декодирование внешних кодов выполняют со стиранием наименее достоверных кодов, что обеспечивает достоверность, близкую к мягкому декодированию. При этом создается эквивалентный канал более высокого качества, по сравнению с исходным каналом. Стертый внешний код может быть исправлен внутрен-

ним кодом, если в проверке на четность многомерного итеративного кода стерт только один внешний код. В этом случае проверка на четность называется ортогональной проверкой относительно данного стирания [8]. Для внутреннего кода используют итеративное декодирование, заключающееся в том, что после контроля всех проверок и исправления стираний, попавших в ортогональные проверки, число стираний может сократиться и в этом случае код декодируют повторно.

В качестве внешних кодов используют короткие помехоустойчивые коды. Таблица наилучших известных двоичных кодов для небольших блоковых длин $n \leq 512$ с минимальным кодовым расстоянием вплоть до $d=29$ приведена в [9]. Постоянно обновляемые таблицы таких кодов также общедоступны на сайте [10]. Согласно таблицам, для своих параметров к наилучшим кодам относят совершенные коды Хемминга и Голея, для других параметров наилучшими кодами будут квадратично-вычетные коды, коды БЧХ, коды Рида-Маллера и др. Алгоритмы декодирования этих кодов достаточно хорошо описаны в известных источниках [9].

Декодирование каскадного кода имеет небольшую асимптотическую сложность, возрастающую примерно линейно в зависимости от длины кода. Небольшая сложность объясняется тем, что внешний наилучший код является относительно коротким кодом, а внутренний многомерный итеративный код декодируют на основе несложных ортогональных проверок.

Кодирование

Разделим исходное информационное сообщение на блоки $A_1 A_2 \dots A_\lambda$ по k символов каждый. Кодируя информационные блоки внешним коротким наилучшим кодом, получим последовательность кодов $B_1 B_2 \dots B_\lambda$.

В качестве внутреннего итеративного кода выбирают не слишком сложный код: код с проверкой на четность, код Хемминга, код БЧХ с небольшим минимальным кодовым расстоянием и т.д. [9]. Для определенности будем рассматривать простейший двоичный код с проверкой на четность. Кодирование внутреннего многомерного кода задают итеративной процедурой [11].

Начальные условия

$$m = 1, C_i^{(0)} = B_i, i = 1..v$$

Пусть $C_i^{(m-1)}$, $i = 1..v$ есть $(m-1)$ - мерные коды, тогда m - мерный код

$$C^{(m)} = C_1^{(m-1)} C_2^{(m-1)} \dots C_v^{(m-1)} R^{(m-1)},$$

где

$$R^{(m-1)} = \sum_{i=1}^v C_i^{(m-1)}, \quad (1)$$

а под суммированием понимается операция по-разрядного сложения кодов по модулю два.

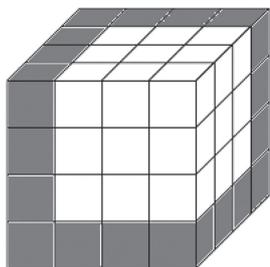


Рис. 1. Трехмерное итеративное кодирование

Таким образом, сначала внешними кодами $B_1 B_2 \dots B_\lambda$ заполняют многомерный информационный куб, а затем вычисляют проверки на четность по измерениям куба, как представлено на *рисунке 1* для случая трехмерного итеративного кодирования. Белым цветом на *рисунке 1* показан информационный куб, а серым – проверки на четность.

Декодирование

Декодирование многомерного каскадного кода начинается с декодирования не внутреннего кода, как обычно в каскадном кодировании, а внешнего кода, который передают по каналу связи. Затем декодируют внутренний многомерный итеративный код с исправлением стертых внешних кодов. Сначала – декодируют 1-но мерный итеративный внутренний код, затем – 2-х мерный и т.д.

Декодирование внутреннего многомерного кода задается итеративной процедурой.

Начальные условия $m=1, C_i^{(0)} = B_i, i=1..v$

Декодирование m -мерного кода:

Шаг 1. Если в коде

$C^{(m)} = C_1^{(m-1)} C_2^{(m-1)} \dots C_v^{(m-1)} R^{(m-1)}$ нет стираний, иди к 3.

Шаг 1. Если в коде $C^{(m)} = C_1^{(m-1)} C_2^{(m-1)} \dots C_v^{(m-1)} R^{(m-1)}$ одно стирание, то корректируем стирание

$$S_j^{(m-1)} = \sum_{i=1, i \neq j}^v C_i^{(m-1)} + R^{(m-1)}, \text{ иди к 3.}$$

Шаг 2. Код $C^{(m)}$ стерт.

Шаг 3. Конец.

Если после декодирования для $m=1, 2, \dots$ стирания еще остались, но их число сократилось, то декодирование повторяется до тех пор, пока либо не будут исправлены все стирания, либо их число после декодирования перестанет сокращаться. Например, при трехмерном итеративном кодировании будет $3v^2 + 3v + 1$ проверок на четность. Декодирование заключается в последовательном контроле всех проверок на чет-

ность и исправлении стирания, если в проверке имеется только одно стирание. Тогда, символ на месте стирания будет равен сумме всех нестертых символов, входящих в проверку. При одном стирании проверка исправляет это стирание. Если проверка содержит более одного стирания, то переходим к контролю следующей проверки.

Параметры многомерного каскадного кода

Информационная длина кода равна

$$K_i = kv^m, \quad (2)$$

где k – информационная длина внешнего кода;

v – длина стороны информационного куба.

Блочная длина многомерного каскадного кода равна

$$N_j = n(v+1)^m, \quad (3)$$

где n – блочная длина внешнего кода.

Многомерный итеративный каскадный код позволяет передавать длинные сообщения при относительно небольшой размерности кода за счет экспоненциальной зависимости информационной длины каскадного кода от размерности кода. Например, для передачи сообщения длиной 1 Мбит достаточно взять внешний код с информационной длиной $k=32$ и всего лишь 3-х мерный внутренний код с $v=32$, тогда $K_i = 32 \cdot 32^3 \approx 1$ Мбит.

Относительная скорость многомерного каскадного кода

$$r = \frac{k}{n} \left(\frac{v}{v+1} \right)^m. \quad (4)$$

При постоянном значении длины стороны куба $v=const$ будем иметь $\lim_{m \rightarrow \infty} r = 0$. Однако, можно выбрать переменную величину $v=v(m)$, зависящую от m , чтобы получить код с постоянной положительной скоростью $\lim_{m \rightarrow \infty} r = const > 0$

$$v(m) = \frac{1}{\left(\frac{k}{rn} \right)^{1/m} - 1}. \quad (5)$$

Минимальное кодовое расстояние кода выражается

$$d = 2^m. \quad (6)$$

При декодировании в пределах минимального кодового расстояния будут гарантированно исправляться стирания кратности $d-1$ и менее.

Часть избыточности внешнего кода можно использовать для исправления ошибок, а часть для обнаружения ошибок и стирания внешнего кода. Тогда вероятность трансформации внешнего кода можно сделать малой величиной.

Оценивание вероятностей приема кода

Вероятность правильного приема многомерного итеративного каскадного кода в биномиальном канале оценивается

$$P_{уд} = \sum_{i=0}^{d-1} C_y^i P_s^i (1 - P_s)^{y-i}, \quad (7)$$

где $\gamma = (v+1)^m$ – блоковая длина внутреннего итеративного кода

а P_s – вероятность стирания внешнего кода.

Оценка (7) соответствует декодированию внутреннего кода в пределах его минимального кодового расстояния, то есть при выполнении только одной итерации.

Вероятность правильного приема при итеративном многопроходном декодировании будем оценивать по вероятности неисправимых комбинаций стираний. Неисправимой комбинацией стираний наименьшего веса будет комбинация из 2^m стираний по 2 стирания в каждом измерении m – мерного кода. Число комбинаций веса 2 в одном измерении многомерного кода будет C_{v+1}^2 . Для m измерений число комбинаций веса 2^m будет $(C_{v+1}^2)^m$. Вероятность правильного приема при итеративном декодировании будет

$$P_{um} = 1 - (C_{v+1}^2)^m P_s^{2^m} \quad (8)$$

В таблице 1 представлены вероятности правильного приема P_{ud} и P_{um} для двух алгоритмов декодирования внутреннего кода в зависимости от вероятности стирания внешнего кода $P_s = 0,01..0,1$ при $k=32$, $n=64$ и $m=3$. Согласно (4) будем иметь $r=0,3$ и $\gamma=216$. Из таблицы видно, что итеративный многопроходной алгоритм обеспечивает существенно более высокую вероятность правильного приема кода, по сравнению с декодированием в пределах минимального кодового расстояния [12].

Таблица 1

Вероятности правильного приема

P _s	Декодирование в пределах d _{min}	Итеративное декодирование
0.01	0.998352	0.999999
0.02	0.925008	0.999999
0.03	0.676857	0.999999
0.04	0.363471	0.999999
0.05	0.149873	0.999999
0.06	0.050038	0.999999
0.07	0.014112	0.999998
0.08	0.003468	0.999994
0.09	0.000759	0.999985
0.1	0.000151	0.999966

Сложность декодирования кода

Сложность декодирования каскадного кода складывается из сложности декодирования внешнего кода и внутреннего кода. Внешний код является коротким наилучшим кодом, сложность которого в силу его небольшой длины ($n \leq 500$) будет незначительной. При длине каскадного кода $N = (v+1)^m$ число внешних кодов в каскадном коде будет примерно оцениваться величиной N/n , а значит, сложность всех внешних

кодов будет

$$C_1 = \frac{c}{n} N = O(N),$$

где c – сложность одного внешнего кода.

Внутренним кодом является простейший код с проверками на четность m – мерного информационного куба. Число проверок m -мерного кода оценивается величиной

$$C_2 = \sum_{i=0}^m m v^{i-1} = O(N).$$

Суммарная асимптотическая сложность будет линейно зависеть от длины кода $O(N)$.

Выводы

Предложена каскадная кодовая конструкция на основе внешнего относительно короткого наилучшего известного кода и внутреннего многомерного итеративного кода. При построении кода реализовано итеративное декодирование в стирающем канале связи. Для исправления одного стирания достаточно всего лишь одной ортогональной проверки на четность. Многомерный итеративный каскадный код позволяет передавать сообщения различной длины, в том числе и длинные многоблочные сообщения, с высокой вероятностью доведения при небольшой сложности реализации.

Литература

1. Варгаузин В.А. Вблизи границы Шеннона // ТелеМультиМедиа, 2005. №6. С.3-10.
2. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр. Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. 1104 с.
3. Гладких А.А. Основы теории мягкого декодирования избыточных кодов в стирающем канале связи. Ульяновск: УЛГТУ, 2010. 253 с.
4. Галлагер Р. Коды с малой плотностью проверок на четность Пер. с англ. под ред. Р.Л. Добрушина. М.: Мир, 1966. 144 с.
5. Arıkan, E. Channel polarization: A method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels / E. Arıkan // IEEE Transactions on Information Theory, 2009. №7(55). P.3051-3073.
6. TM Synchronization and Channel Coding, Recommendation for Space Data System Standards CCSDS 131.0-B-1, Issue 1, Blue Book, Consultative Committee for Space Data Systems, September, 2003. s.6.
7. Элайес П. Безошибочное кодирование. В сб. «Коды с обнаружением и исправлением ошибок». М.: ИЛ, 1956. С.59-71.
8. Колесник В.Д., Мирончиков Е.Т. Декодирование циклических кодов. М.: Связь, 1968. 251 с.
9. Мак-Вильямс Ф.Дж., Слоэн Н.Дж.А. Теория кодов, исправляющих ошибки. Пер. с англ. М.: Связь, 1979. 744 с.
10. Grassl M. Bounds on the minimum distance of linear codes and quantum codes. Online available at <http://www.codetables.de>, 2007.
11. Квашенников В.В., Турилов В.А. Патент РФ № 2621971 Н04L 1/20 Способ передачи многоблочных сообщений в комплексах телекодовой связи. Оpubл. 08.06.2017. Бюл. №16.
12. Квашенников В.В. Многомерные каскадные коды в каналах телекодового управления // Телекоммуникации, 2018. №6. С.2-6.

УДК 004.738

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОПЕРАТИВНОСТИ ДОВЕДЕНИЯ СООБЩЕНИЙ В ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ ПОДСИСТЕМЫ АСУ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ METHODS OF ASSESSING THE EFFICIENCY OF DELIVERING MESSAGES IN THE TRANSPORT NETWORK OF THE TELECOMMUNICATIONS SUBSYSTEM ACS FOR GENERAL USE

Михаил Алексеевич Светилов

начальник 2 направления
7 управления
ГОУ ГШ ВС РФ
E-mail: svetilov1@yandex.ru

Аннотация

В статье предложена методика оценки среднего времени доведения сообщений в транспортной сети телекоммуникационной подсистемы в зависимости от топологии, производительности ретрансляторов, пропускной способности каналов передачи данных для заданной интенсивности передачи сообщений по сети.

Ключевые слова: автоматизированная система управления, телекоммуникационная система, передача сообщений, среднее время, система массового обслуживания, приоритет.

Summary

The article proposes a method for estimating the average message delivery time in the transport network of the telecommunications subsystem depending on the topology, repeaters performance, and data transmission channels throughput for a given message transmission rate over the network.

Keywords: automated control system, telecommunication system, message transfer, average time, system of mass service, priority.

В современном мире экономика, производство, другие отрасли народного хозяйства и соответствующая им инфраструктура способны эффективно функционировать только при наличии эффективного управления ими. Такое управление реализуется в рамках соответствующих автоматизированных систем управления (АСУ). В настоящее время в Российской Федерации существует множество АСУ народнохозяйственного назначения. К ним относятся, например, АСУ нефтегазовой промышленности, АСУ дорожного движения, АСУ «Выборы», АСУ силовых министерств и ведомств и другие [4-8]. Во многом эффективность таких АСУ зависит от их информационной сети, обеспечивающей циркулирование управляющей и осведомляющей информации между соответствующими звеньями управления (ЗУ) АСУ [9].

Вопросам построения и функционирования таких АСУ посвящено много работ, в которых раскрываются вопросы анализа и синтеза структур, алгоритмов и процедур действия различных подсистем АСУ [1,2,3].

Одним из важнейших типов АСУ народнохозяйственного назначения являются АСУ терри-

ториально-распределёнными подвижными объектами (ПО). К ним, в частности, относятся АСУ нефтегазовой промышленности, АСУ дорожного движения, АСУ «Выборы», АСУ «Стрелец-Мониторинг» и другие [4-8]. Их особенностью является то, что, во-первых, ЗУ таких АСУ географически разнесены на значительные расстояния друг от друга (десятки км). Во-вторых, все или отдельные ЗУ таких АСУ являются ПО. В третьих, информационная сеть таких АСУ строится, как правило, на проводных или радиоканалах. Для инвариантности рассмотрения таких АСУ к конкретной предметной области впредь будем их называть АСУ общего назначения (АСУ ОН). Главной особенностью всех АСУ ОН является иерархический принцип построения, вытекающий из специфики задач, решаемых на каждом уровне иерархии. При этом верхнее ЗУ решает общесистемные (целевые) задачи всей АСУ ОН. Среднее ЗУ решают задачи координации процессов, выполняемых нижними (исполнительными) ЗУ, при этом результаты выполнения отправляются на верхнее ЗУ. Нижние ЗУ решают конкретные задачи по управлению соответствующим технологическим процессом, при

этом получают осведомляющую информацию от контрольно-измерительных приборов и исполнительных устройств. Результаты решения конкретных задач нижние ЗУ отправляют на среднее ЗУ. Каждое ЗУ представляет собой совокупность аппаратно-программных (компьютерных) средств, среди которых имеется автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора [9].

Телекоммуникационная подсистема (информационная сеть) АСУ ОН предназначена для доведения информации до объектов управления (ЗУ), сбора информации от ПО (ЗУ) об их состоянии и готовности выполнять возложенные на них функции. От качества функционирования телекоммуникационной подсистемы во многом зависит эффективность функционирования всей АСУ ОН.

Объединение телекоммуникационных средств в подсистему [10] позволит сократить их количество по сравнению с их автономным размещением на каждом объекте телекоммуникационной сети, более эффективно распределять информационную нагрузку в особых условиях обстановки. Как правило, телекоммуникационная подсистема АСУ ОН включает составляющие, приведенные на *рисунке 1*.

При построении телекоммуникационной подсистемы АСУ ОН необходимо задать ее структуру, атрибутивные параметры, и алгоритмы функционирования, в частности [12]:

1. Топологию сети, исходя из задач, возлагаемых на объекты управления.
2. Пропускную способность ретрансляторов сети, исходя из районов и маршрутов нахождения управляемых объектов (ЗУ, ПО).
3. Процедуры маршрутизации и процедуры управления потоками информации в сети.

Качество функционирования телекоммуникационной подсистемы АСУ ОН, как правило, определяется оперативностью доставки сообщений как «снизу-вверх», так и «сверху-вниз», при этом показателем качества (оперативности) яв-

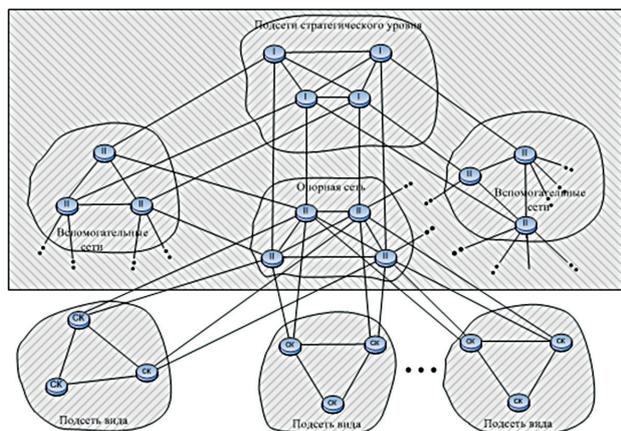


Рис. 1. Телекоммуникационная подсистема АСУ ОН

ляется среднее время доведения сообщений [9].

Для определения среднего времени доведения сообщений в зависимости от топологии сети, приоритета сообщений « r », интенсивности поступления сообщений в сеть W и пропускной способности каналов передачи данных (n) предлагается методика расчета, в основу которой положен метод разложения среднего доведения сообщений на составляющие, относящиеся к отдельным ретрансляторам и каналам передачи данных [11].

Основные допущения в данном исследовании таковы:

- 1) процессы обслуживания сообщений в ретрансляторах (ЗУ) и доставки их по каналам передачи данных являются независимыми;
- 2) потоки информации являются простейшими потоками;
- 3) длительности обслуживания сообщений в ретрансляторах (ЗУ), а также в каналах передачи данных телекоммуникационной сети подчиняются экспоненциальному распределению.

Теоретическим обоснованием преимущества моделей, основанных на предположении о «независимости», являются предельные теоремы о потоках [12], так как поток на каждом элементе сети образуется суперпозицией определенного числа потоков на других элементах. Предположение о независимости широко используется для анализа телекоммуникационных сетей [13, 14, 15, 16].

Дополнительными допущениями в рамках методики являются:

- наличие приоритетности сообщений;
- в ретрансляторах (ЗУ) и каналах передачи данных сети реализована дисциплина обслуживания сообщений с относительным приоритетом, что является общепринятым при исследованиях сетей в отечественной и зарубежной практике [14, 15].

3. Выбор направлений дальнейшей передачи в телекоммуникационной сети осуществляется с адресом, содержащимся в заголовке сообщения, по фиксируемой таблице маршрутизации, которая хранится на каждом элементе сети.

4. Управление потоками в сети отсутствует (маршруты статичны).

Сделанные допущения, позволяют разложить среднее время доведения пакетов в сети $\bar{T}(r)$ на такие составляющие:

- а) средние времена задержки на ретрансляторах $\bar{t}_i(r)$;
- б) средние времена задержки в каналах передачи данных $\bar{t}_j(r)$

$$T(r) = \sum_{i=1}^M \frac{\lambda_i(r)}{\gamma(r)} \bar{t}_i(r) + \sum_{j=1}^N \frac{\lambda_j(r)}{\gamma(r)} \bar{t}_j(r), \quad (1)$$

где M – число ретрансляторов в транспортной сети;

N – число каналов, образованных ретрансляторами;

$\gamma(r)$ – суммарный входной пуассоновский поток, поступающих сообщений r -го приоритета в сеть от абонентов;

$\lambda_i(r)$ – поток сообщений r -го приоритета, поступающих на вход i -го ретранслятора;

$\lambda_j(r)$ – поток пакетов r -го приоритета, поступающих на вход i -го канала передачи данных.

Тогда $\lambda_{m,k}(r)$ – поток сообщений, поступающий от абонентов на вход m -ретранслятора для абонентов k -ой опорной сети, определяется выражением:

$$\gamma(r) = \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^M \gamma_{m,k}(r) \quad (2)$$

Очевидно, что интенсивности $\lambda_i(r)$ и $\lambda_j(r)$ определяются выражениями:

$$\lambda_i(r) = \sum_m \sum_k \gamma_{m,k}(r) \quad m, k : \omega_i \in \pi_{m,k}, \quad (3)$$

$$\lambda_j(r) = \sum_m \sum_k \gamma_{m,k}(r) \quad m, k : \eta_j \in \pi_{m,k}, \quad (4)$$

где $\pi_{m,k}$ – маршрут, по которому ретранслируются сообщения от m -го к k -му ретранслятору.

Введенные допущения позволяют представить ретранслятор и каналы передачи данных в виде систем массового обслуживания типа [16]. Тогда выражения для определения времени задержки в телекоммуникационной сети имеют следующий вид:

$$\bar{t}_i(r) = \frac{\sum_{g=1}^R \frac{\rho_i(g)}{\omega_i(g)}}{(1 - \sum_{g=1}^r \rho_i(g))(1 - \sum_{g=1}^{r-1} \rho_i(g))} + \frac{1}{\omega_i(r)}, \quad (5)$$

$$\bar{t}_j(r) = \frac{\sum_{g=1}^R \frac{\rho_j(g)}{\eta_j(g)}}{(1 - \sum_{g=1}^r \rho_j(g))(1 - \sum_{g=1}^{r-1} \rho_j(g))} + \frac{1}{\eta_j(r)}, \quad (6)$$

где R – число приоритетов (категорий срочности) в транспортной сети;

$\rho_i(r) = \frac{\lambda_i(r)}{\omega_i(r)}$ – коэффициент загрузки i -го ретранслятора сообщениями r -го приоритета;

$\rho_j(r) = \frac{\lambda_j(r)}{\eta_j(r)}$ – коэффициент загрузки j -го канала передачи данных сообщениями r -го приоритета.

Подставляя (5) и (6) в (1) получаем выражение для определения среднего времени доведения сообщений в транспортной сети.

$$\bar{T}(r) = \sum_{i=1}^M \lambda_i(r) \gamma(r) \left[\frac{\sum_{g=1}^R \frac{\rho_i(g)}{\omega_i(g)}}{(1 - \sum_{g=1}^r \rho_i(g))(1 - \sum_{g=1}^{r-1} \rho_i(g))} + \frac{1}{\omega_i(r)} \right] +$$

$$+ \sum_{j=1}^N \lambda_j(r) \gamma(r) \left[\frac{\sum_{g=1}^R \frac{\rho_j(g)}{\eta_j(g)}}{(1 - \sum_{g=1}^r \rho_j(g))(1 - \sum_{g=1}^{r-1} \rho_j(g))} + \frac{1}{\eta_j(r)} \right] \quad (7)$$

Таким образом, выражение (7) позволяет получить оценку среднего времени доведения сообщений в транспортной сети телекоммуникационной подсистемы АСУ ОН в зависимости: от топологии; производительности ретрансляторов; пропускной способности каналов передачи данных для заданной интенсивности передачи сообщений по сети.

Следует иметь в виду, что влияние адаптивной маршрутизации и управление потоками в сети на среднее время доведения сообщений в сети может быть учтено только в имитационной модели (статистической) модели передачи информации в сети.

Литература

1. Четвериков В.Н. Автоматизированные системы управления. М.: Высшая школа, 2001. 149 с.
2. Меньков А.В., Острейковский В.А. Теоретические основы автоматизированного управления. Учебник для вузов. М.: ОНИКС, 2011. 360 с.
3. Втюрин В.А. Автоматизированные системы управления. Основы АСУ. Учебник. СПб.: 2006. 152 с.
4. Андреев Е.Б., Попадько В.Е. Технические средства автоматизированных систем управления технологическими процессами нефтегазовой промышленности. Учебное пособие. М: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2010. 269 с.
5. Панарин В.В., Зайцев Л.А. Автоматизированные системы управления в трубопроводном транспорте нефти. М.: Недра, 2006. 255 с.
6. <http://telemehanika.com/category/produkcija/asudd-megapolis>
7. ГАС «Выборы» Общее описание системы Часть 9. Описание подсистемы связи и передачи данных (ИРЦВ.42 5100 5.001.П.Д.2-8)
8. <http://59.mchs.gov.ru/news/detail.php?news=27194>
9. Цимбал В. А. Информационный обмен в сетях передачи данных. Марковский подход: монография. М.: Вузовская книга, 2014. 144 с.
10. Шварц М. Сети ЭВМ. Анализ и проектирование. Пер. с англ. под ред. В.А. Кожинашвили. М.: Радио и связь, 1981. 189 с.
11. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. М.: Машиностроение, 1979. 432 с.
12. Суздаев А.В. Сети передачи информации АСУ. М.: Радио и связь, 1983. 256 с.
13. Захаров Г.Н. Методы исследования сетей передачи данных. М.: Радио и связь, 1982. 335 с.
14. Глушков В.М. Сети ЭВМ. М.: Связь, 1977. 312 с.
15. Клейнрок Л. Вычислительные сети с очередями. М.: Мир, 1977. 256 с.
16. Саати Т.Л. Элементы теории массового обслуживания и ее приложений. М.: Советское радио, 1971. 276 с.

УДК 621.391

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МОДЕМА ТРОПОСФЕРНОГО КАНАЛА РАДИОСВЯЗИ С КОДОВЫМ ОРТОГОНАЛЬНЫМ УПЛОТНЕНИЕМ ДАННЫХ

MATHEMATICAL MODEL OF THE MODEM OF THE TROPOSPHERIC RADIO CHANNEL WITH CODE ORTHOGONAL DATA COMPRESSION

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

Евгений Валерьевич Шмырин

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

Валерий Владимирович Кургузов

преподаватель
филиал ВА РВСН им. Петра
Великого (г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел.: +7 (915) 181-35-17

Аннотация

В статье проведен анализ энергетических параметров тропосферных каналов радиосвязи, определены противоречивые взаимосвязи между помехоустойчивостью и надежностью канала. Предложена структурная схема модема радиоканала с кодовым ортогональным уплотнением данных, представлены аппроксимационные выражения для оценки его помехоустойчивости и связанной с ней надежности канала. Показано, что увеличение длины кода способствует увеличению пропускной способности канала тропосферной связи и уменьшению требуемой мощности радиопередатчика.

Ключевые слова: тропосферное распространение, надежность канала, помехоустойчивость, отношение сигнал/шум, кодовое уплотнение данных, ортогональные сигналы, полярный код, корреляционный прием, модем.

Summary

The article analyzes the energy parameters of tropospheric radio communication channels, identifies conflicting relationships between noise immunity and channel reliability. A block diagram of a modem radio channel and code orthogonal data compression is proposed, approximation expressions are presented to estimate its noise immunity and the associated channel reliability. It is shown that an increase in the code length contributes to an increase in the throughput of the channel of the tropospheric communication and a decrease in the required power of the radio transmitter.

Keywords: tropospheric distribution, channel reliability, noise immunity, signal-to-noise ratio, data code multiplexing, orthogonal signals, useful code, correlation reception, modem.

Известен механизм дальнего тропосферного распространения радиоволн дециметрового (300...3000) МГц и сантиметрового (3...30) ГГц диапазонов и аналитическое выражение, определяющее мощность сигнала P_c в точке приема [1]:

$$P_c = P_p n_p G_1 G_2 / (L_1 L_2 L_3 L_4 L_5), \quad (1)$$

где P_p – мощность передатчика, Вт;

n_p – число разнесений (частотных, тропосферно-угловых);

L_1 – затухание (ослабление) радиосигнала в свободном пространстве, определяемое как

$$L_1 = (nr / \lambda)^2, \quad (2)$$

r – дальность связи по поверхности Земли;

λ – длина волны;

L_2 – дополнительное затухание сигнала за счёт тропосферного рассеивания [1], численные значения которого представлены в таблице 1.

Таблица 1

Значения L_2 (дБ) для различных значений $\lambda(f)$ и r

$f, \text{ГГц}$	Дальность радиосвязи $r, \text{км}$							
	125	150	175	200	225	250	275	300
1,0	62,5	65	66,3	67,5	69	71,5	73,1	75
5,0	71,5	74	75,6	77	80	81,5	83,5	86,5
10,0	77	79	82,2	85	87,5	90	92,5	95

L_3, L_4 – затухания сигнала в фидерных трактах передачи и приёма соответственно, величина которых составляет не более 2дБ [1];

L_5 – климатическая поправка, величина которой зависит от климатических условий [1];

G_1, G_2 – коэффициенты усиления передающей и приёмной антенн.

Анализ выражения (1) показывает:

- с уменьшением длины волны (увеличивается частота сигнала) затухание сигнала в свободном пространстве растёт (при $r=const$ увеличение частоты в 10 раз вызывает увеличения L_1 на два десятичных порядка, т.е. на 20дБ);

- при $\lambda=const$ увеличение дальности r в 2 раза приводит к увеличению L_1 в 4 раза (6дБ).

Численные значения P_c для $G_1=G_2=32,5\text{дБ}$ (1772 раза), $n_p=1;2;4$, $r=125 \text{ км}; 250 \text{ км}, P_1=100 \text{ Вт}; 300 \text{ Вт}; 1000 \text{ Вт}, f=5 \text{ ГГц}$ представлены в таблице 2. При этом

$$L_\Sigma = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 = 7,81 \cdot 10^{19}$$

для $r=125 \text{ км}; L_\Sigma = 5,7 \cdot 10^{21}$ для $r=250 \text{ км}$.

Полученные значения P_c (таблица 2) позволяют получить отношение спектральной плотности мощности сигнала к спектральной плотности мощности шума

$$h_0^2 = P_c T_e / N_0,$$

где T_e – длительность двоичного сигнала, равная $1/R$;

Таблица 2

Значения P_c (Вт) при $n_p=var, r=125 \text{ км}, r=250 \text{ км}$

$P_p, \text{Вт}$	n_p	$r = 125 \text{ км}$	$r = 250 \text{ км}$
100	1	$4 \cdot 10^{-12}$	$6,28 \cdot 10^{-14}$
	2	$8 \cdot 10^{-12}$	$1,25 \cdot 10^{-13}$
	4	$1,6 \cdot 10^{-11}$	$2,5 \cdot 10^{-13}$
300	1	$1,2 \cdot 10^{-11}$	$1,88 \cdot 10^{-13}$
	2	$2,4 \cdot 10^{-11}$	$3,76 \cdot 10^{-13}$
	5	$4,8 \cdot 10^{-11}$	$7,52 \cdot 10^{-13}$
1000	1	$4,8 \cdot 10^{-11}$	$6,28 \cdot 10^{-13}$
	2	$8 \cdot 10^{-11}$	$1,26 \cdot 10^{-12}$
	4	$1,6 \cdot 10^{-10}$	$2,52 \cdot 10^{-12}$

R – скорость передачи двоичных символов;

$N_0 = kT$;

k – постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/}^\circ\text{К}$;

T – рабочая температура радиоприемника.

Значение h_0^2 и вид сигнала радиосвязи определяют вероятность ошибки в приеме бита данных, т.е. приближенную помехоустойчивость тропосферного канала связи, однако не в полной мере, так не учитываются замирания сигнала различной физической природы [1, 2]. Необходимо учитывать, что на интервале сеанса связи в разные отрезки времени будет наблюдаться различная вероятность битовой ошибки P_e , которая является сложной функцией

$$P_e = F(\epsilon, \sigma, f),$$

где ϵ, σ, f – изменяющиеся параметры, соответственно, диэлектрическая проницаемость, проводимость тропосферной среды в объеме рассеяния, и рабочая частота канала связи.

С учетом этого, качество тропосферной связи необходимо оценивать не только вероятностью P_e , но и надежностью канала связи H , которая характеризует вероятность того, что за время сеанса связи вероятность P_e не превысит заданной величины $P_{e, \text{дон}} \leq P_e$ [1, 2].

В известной литературе надежность H оценивается с помощью системы графических зависимостей, которые не могут использоваться при математическом моделировании тропосферных каналов связи [1]. Кроме того, система указанных графических зависимостей не содержит параметров объема рассеяния ϵ, σ и не учитывает их вероятностный характер изменения.

В результате исследований нами разработана совокупность аналитических выражений, которая позволяет в программной среде *MathCAD* рассчитывать значения надежности H при известных энергетических параметрах тропосферного канала связи [3]

$$H = \frac{1}{2} \left[1 + \int_0^{\left(\frac{\ln h_0^2 \text{ max} - \ln h_0^2 \text{ min}}{2b} \right)} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \right]$$

при $P_e = f(P_c, T_e) = const$,

где $h_0^2 \text{ max}$ – максимальное значение отношения сигнал/шум, которое может обеспечить тракт радиопередачи на входе радиоприемника при

Таблица 3
Значения $H = f(h_{0\max}^2, h_{0\min}^2, b)$

$b=1$					$b=2$				
$h_{0\max}^2=1000$					$h_{0\max}^2=1000$				
$h_{0\min}^2$	1	10	20	30	$h_{0\min}^2$	1	10	20	30
H	0,99985	0,99	0,975	0,962	H	0,958	0,875	0,836	0,81
$h_{0\max}^2=300$					$h_{0\max}^2=300$				
$h_{0\min}^2$	1	10	20	30	$h_{0\min}^2$	1	10	20	30
H	0,998	0,956	0,912	0,875	H	0,923	0,803	0,75	0,72

фиксированной дальности связи r (в данном случае будем использовать одиночный прием, однако это не влияет на общность полученных результатов);

$h_{0\min}^2$ - минимально возможное отношение сигнал/шум, по которому первая решающая схема приемника выносит решение о принятом двоичном символе с заданной вероятностью ошибки P_e ; b - дисперсия коэффициента затухания сигнала, находится в пределах 1-3 [2,3].

Численные значения H для различных $h_{0\max}^2$, $h_{0\min}^2$, b представлены в таблице 3.

Анализ таблицы 3 позволяет сделать новые выводы:

- увеличить надежность канала тропосферной связи можно двумя способами:

- 1) увеличивать мощность радиопередатчика, т.е. увеличивать $h_{0\max}^2$;

- 2) уменьшать $h_{0\min}^2$ по значению, которого еще возможен достоверный прием данных;

- увеличение дисперсии b (нестационарность параметров объема тропосферных слоев рассеяния) существенно снижает надежность канала тропосферной связи;

- целесообразно использовать методы кодирования данных при которых требуется $h_{0\min}^2 \approx 1$;

- полученные оценки H совпадают с известными графическими зависимостями [1].

Проведем анализ возможностей тропосферной системы связи по обеспечению $h_{0\max}^2$.

Зададимся значением $N_{ш} = 11$, полосой пропускания $\Delta F = 36$ МГц, что соответствует реальным системам [1].

В этом случае мощность шума равна $P_{ш} = 1,5 \cdot 10^{-12}$ Вт.

Тогда, используя данные таблицы 1, можно определить $h_{0\max}^2$, которое для $P_1 = 1000$ Вт, $n_p = 4$, $r = 125$ км равно $1,6 \cdot 10^{-10} / 1,5 \cdot 10^{-12} \approx 100$; при уменьшении мощности P_1 ($P_1 = 300$ Вт) значение $h_{0\max}^2 = 4,8 \cdot 10^{-11} / 1,5 \cdot 10^{-12} \approx 30$.

Если оценивать значение вероятности P_e по

известным выражениям [2], то получим для сигналов с двоичной относительной фазовой модуляцией

$$P_{e(фм)} = 1/(2(1+h_{0\max}^2)) \approx 1/202 \approx 5 \cdot 10^{-3} \quad \text{для } P_1 = 1000 \text{ Вт};$$

$$P_{e(фм)} = 1,5 \cdot 10^{-3} \quad \text{для } P_1 = 300 \text{ Вт},$$

которые не удовлетворяют требованиям по помехоустойчивости [1].

Теперь рассмотрим случай, когда $\Delta F = 1,2$ кГц, т.е. используется низкоскоростная передача данных.

В этом случае мощность шума $P_{ш} = 5 \cdot 10^{-17}$ Вт и $h_{0\max}^2 = 6,28 \cdot 10^{-14} / 5 \cdot 10^{-17} \approx 1,26 \cdot 10^3$ для $P_1 = 100$ Вт, $n_p = 1$, $r = 250$ км, а вероятность $P_{e(фм)} = 4 \cdot 10^{-3}$. При этом в известной научной литературе полагают, что надежность канала $H \approx 1$, не забывая о том, что в тропосферных каналах радиосвязи вероятность P_e зависит как от $h_{0\max}^2$, так и от $h_{0\min}^2$. Если значение $h_{0\min}^2 = 5$ (глубокие интерференционные замирания), то вероятность $P_{e(фм)} \approx 1/2 \cdot e^{-h_{0\min}^2} = 3,35 \cdot 10^{-3}$ если $h_{0\min}^2 = 2$, то $P_e = 0,067$ и канал не обеспечивает требуемую помехоустойчивость.

Предлагается новое техническое решение [4], направленное на одновременное выполнение

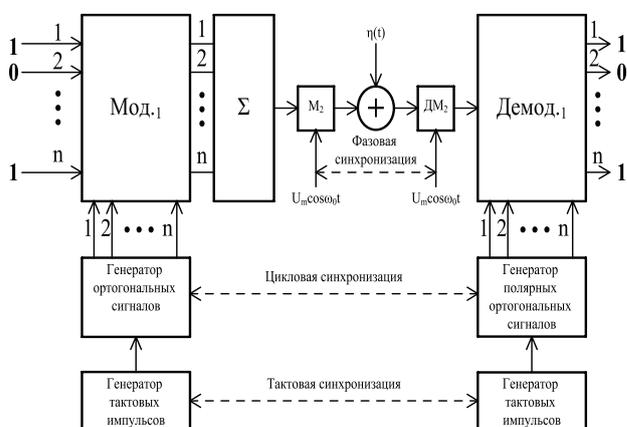


Рис. 1. Структурная схема модема для тропосферного канала связи

требований как по надежности, так и по помехоустойчивости тропосферного канала радиосвязи, в основе которого лежит структурная схема модема (рисунк 1), который использует кодовое ортогональное уплотнение данных на передающей стороне и корреляционное их декодирование (прием в целом) на приемной стороне.

Двоичные данные (n -разрядов) параллельным кодом поступают на модулятор (Мод. 1) ортогональных сигналов, которые формируются специальным генератором функций Уолша-Адамара. Каждому двоичному символу данных ставится в однозначное соответствие свой ортогональный n -разрядный сигнал в полярном коде. В сумматоре (Σ) формируется многоуровневый n -разрядный групповой сигнал, который переносит n бит данных (т.е. групповой сигнал – безызбыточный), а фазовый модулятор (M_2) переносит спектр группового сигнала в требуемую область радиочастотного диапазона ω_0 . В линии радиосвязи на сигнал воздействует аддитивный белый гауссовский шум (АБГШ) со спектральной плотностью мощности $N_0 = const$, на рисунке 1 показан функцией $\eta(t)$.

На приемной стороне демодулятор (DM_2) выделяет низкочастотный многоуровневый групповой сигнал, а демодулятор первый ($Демод.1$) осуществляет вычисление функций взаимной корреляции группового сигнала и полярных ортогональных сигналов. Если значение функций взаимной корреляции положительно, то выносятся решение о принятом нулевом символе, если функция взаимной корреляции отрицательная, то принят единичный символ [4]. Для функционирования схемы необходимо осуществлять фазовую синхронизацию радиочастотных сигналов $U_m \cos \omega_0 t$, цикловую и тактовую синхронизацию соответствующих генераторов.

Аналитические выражения, определяющие вероятность P_g на выходе демодулятора 1 ($Демод.1$), отсутствуют. Они определены в результате имитационного моделирования [4] и имеют вид при $h_{0\ min}^2 \geq -2$ дБ:

- для $n=8$ вероятность P_g равна

$$P_g = 1,951 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-2,015 h_{0\ min}^2} - 1,077 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-2,249 h_{0\ min}^2};$$

- для $n=16$ вероятность P_g равна

$$P_g = 1,495 \cdot 10^{-5} \cdot e^{-1,489 h_{0\ min}^2} - 1,51 \cdot 10^{-6};$$

- для $n=32$ вероятность P_g равна

$$P_g = 1,502 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-1,908 h_{0\ min}^2} - 1,95 \cdot 10^{-6}.$$

Если $h_{0\ min}^2$ на входе DM_2 равно 0дБ ($h_{0\ min}^2 = 1$), то получим:

- для $n=8$ вероятность $P_g = 1,23 \cdot 10^{-4}$;

- для $n=16$ вероятность $P_g = 1,07 \cdot 10^{-5}$;

- для $n=32$ вероятность $P_g = 1,05 \cdot 10^{-6}$;

- для $n=64$ вероятность $P_g = 10^{-7}$.

В этом случае $h_{0\ min}^{2(BPC)}$ на входе второй ре-

шающей схемы приемника будет равно $h_{0\ min}^{2(BPC)} = n \cdot h_{0\ min}^2$.

Возвращаясь к таблице 3, отметим:

- при $h_{0\ min}^2 = 1$ во всех случаях получаем наибольшую надежность тропосферного канала радиосвязи, при этом вероятность $P_g = 1,23 \cdot 10^{-4}$;

- с увеличением длины ортогонального кода n вероятность P_g уменьшается, а следовательно можно допускать работу канала радиосвязи при $h_{0\ min}^2 < 1$, что приведет к увеличению показателя надежности H ;

- применение кодового ортогонального уплотнения данных позволяет уменьшить мощность радиопередатчика и увеличить пропускную способность тропосферного канала радиосвязи.

Заключение

Учет показателя надежности тропосферного канала связи позволяет определить требования по мощности радиопередатчика на фиксированной дальности связи и заданной полосе пропускания.

Предложена структурная схема модема тропосферного канала радиосвязи с ортогональным кодовым уплотнением данных, который обеспечивает заданные требования к каналу как по надежности, так и по помехоустойчивости информационного обмена.

Представлены аппроксимационные аналитические выражения, которые позволяют определить помехоустойчивость радиоканала на минимально допустимых отношениях сигнал/шум.

Применение кодового ортогонального уплотнения данных на передающей стороне и корреляционного их декодирования на приемной стороне позволяет увеличить пропускную способность тропосферного канала радиосвязи и уменьшить требуемую мощность радиопередатчика по сравнению с существующими системами.

Литература

1. Давыденко Ю.И. Дальняя тропосферная связь. М.: Военное издательство МО СССР, 1968.
2. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сигналов. М.: Сов. радио, 1963.
3. Зеленовский В.В., Зеленовский Ю.В., Зеленовский А.В., Шмырин Е.В., Ржаных А.В. Оценка качества передачи данных в декаметровых радиоканалах с ионосферной волной // Известия Института инженерной физики, 2019. №1(51). С.18-21.
4. Зеленовский В.В., Зеленовский Ю.В., Зеленовский А.В., Дурнов А.С. Статистические характеристики системы передачи с кодовым ортогональным уплотнением данных при воздействии гауссова шума // Электросвязь, 2018. №7. С.42-45.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 338.583

К ПРОБЛЕМЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

TO THE PROBLEM OF COMPETITIVENESS OF SOFTWARE PRODUCTS OF DOMESTIC PRODUCTION



Евгений Николаевич Надеждин

доктор технических наук, профессор
профессор кафедры информатики и
информационных технологий
ФГБОУ ВО «Тульский государственный
педагогический университет имени Л.Н. Толстого»
Адрес: 300026, г. Тула, пр. Ленина, д. 125
Тел.: +7 (4872) 35-14-88
E-mail: en-hope@yandex.ru

Олег Вадимович Шабалин

кандидат технических наук
начальник отдела сопровождения НИОКР
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: 8 (4967)35-31-93
E-mail: sh_o_v@list.ru

Дмитрий Александрович Шаранов

аспирант
Шуйский филиал ФГБОУ ВО «Ивановский
государственный университет»
Адрес: 155908, Ивановская обл.,
г. Шуя, ул. Кооперативная, д.24
Тел.: +7 (49351) 3-11-22
E-mail: dima.shar55@mail.ru

Игорь Александрович Игнатенко

начальник отдела специального программно-
математического обеспечения
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: 8 (4967)35-31-93
E-mail: spmo@iifmail.ru

Аннотация

В статье рассмотрена задача создания программных продуктов, отвечающих комплексу современных требований и востребованных на международном рынке информационных технологий. Изучены и систематизированы факторы, определяющие конкурентоспособность инновационного программного продукта. Обоснован подход к повышению качества программного продукта и обеспечению его конкурентоспособности на основе рациональной организации процесса проектирования.

Ключевые слова: программный продукт, конкурентоспособность, конкурентные преимущества, управление проектом.

Summary

The task of creating software products that meet the complex of modern requirements and are in demand in the international market of information technology is considered. The factors determining the competitiveness of innovative software product are studied and systematized. The approach to improving the quality of the software product and ensuring its competitiveness on the basis of rational organization of the design process is justified.

Keywords: software product, competitiveness, competitive advantages, project management.

В современных условиях темпы социально-экономического развития России в значительной степени определяются успехами в области освоения новых информационных и коммуникационных технологий. Необходимым условием успешной реализации амбициозных планов по инновационному развитию отечественной экономики является ликвидация технологического отставания от ведущих индустриальных государств Европы и Азии. В первую очередь это относится к вопросам разработки общего и прикладного программного обеспечения (ПО) автоматизированных систем управления и информационных сетей различного назначения.

Традиционно при обосновании бизнес-проекта, связанного с созданием программного продукта (ПП), проводятся системные маркетинговые исследования, составной частью которых является глубокое изучение предметной области на основе патентных материалов и существующих образцов-аналогов. Любая ИТ-компания, выполняя ресурсозатратные инновационные проекты, намерена в дальнейшем развивать полученные проектные решения, а также адаптировать их под требования потенциальных потребителей и продвигать на рынке программных продуктов. Важным аспектом обоснования концепции проекта являются вопросы оцен-

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ки конкурентоспособности создаваемого программного продукта.

Традиционно *конкурентоспособность* рассматривают как важнейшую характеристику товара, отражающую его отличие от товара-конкурента как по степени соответствия конкретной общественной потребности, так и по затратам на ее удовлетворение [1]. Конкурентоспособность ПП имеет отличительные особенности, которые можно охарактеризовать через конкурентные преимущества.

К числу конкурентных преимуществ ПП следует отнести: функциональность на уровне брендовых продуктов аналогичного назначения; надежная технологическая платформа; привлекательное соотношение цена/качество; высокая степень доверия к ПП; гибкость настройки и адаптации.

Наиболее привлекательным является ПП, который соответствует потребностям по техническим параметрам и финансовым возможностям потребителя. В современных условиях потенциальный потребитель часто стремится минимизировать совокупные затраты на покупку, сопровождение и модернизацию ПП.

Схема формирования конкурентоспособности программного продукта представлена на *рисунке 1*.

Анализ опыта разработки прикладного ПО ведущих отечественных и зарубежных фирм-разработчиков позволил выявить ряд существенных факторов, оказывающих неблагоприятное воздействие на эффективность и качество ПП и стимулирующих рост снижения его конкурентоспособности на рынке:

- 1) противоречивость и неполнота требований заказчика;
- 2) отсутствие механизма конструктивного взаимодействия с заказчиком;
- 3) дефицит обмена опытом со смежными организациями;
- 4) отсутствие научно-технического задела у разработчика;
- 5) недостаток необходимых ресурсов: материальных, технологических, интеллектуальных, временных;
- 6) неполный учет и некорректный анализ факторов проектного риска при создании, внедрении и пробной эксплуатации программного обеспечения [2, 3, 5];
- 7) повышенная текучесть кадров проектной организации;
- 8) ошибки в оценках трудоемкости и сроков работ;
- 9) использование инновационных, но недостаточно апробированных технологий разработки.

Оценка конкурентоспособности программного продукта

При наличии множества продуктов-аналогов и разнонаправленности влияния факторов на качество ПП оценка конкурентоспособности производится по отдельными/или по совокупным показателям. Известные методики расчета совокупного показателя конкурентоспособности можно условно разбить на четыре группы [6]:

- 1) оценка на основе одного показателя;
- 2) оценка на основе взвешенной суммы различных показателей;
- 3) оценка по принципу среднего геометрического отдельных показателей;
- 4) оценка на основе взвешенных сумм рейтинговых значений отдельных показателей.

Рассмотрим первые два метода оценки конкурентоспособности проекта, которые являются наиболее предпочтительными применительно к разработке ПП.

1. Оценка конкурентоспособности ПП в сравнении с аналогичными продуктами по отдельным показателям:

$$Q_i = \frac{p_i}{p_k}, i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где Q_i – показатель конкурентоспособности по i -му показателю;

p_i – значение i -го показателя оцениваемого программного продукта;

p_k – значение i -го показателя k -го продукта конкурента;

n – количество показателей.

Если характеристики ПП описываются качественными параметрами [3], то предварительное определение количественных значений этих показателей производится с использованием метода экспертных оценок [4]:

$$p_i = \sum_{j=1}^m \sum_{g=1}^d x_{ijg}, i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где x_{ijg} – оценка, выставленная g -м экспертом j -й качественной характеристике i -го показателя;

n – количество параметров;

m – количество качественных характеристик;

d – количество экспертов.

2. Для каждой группы показателей определяется абсолютная совокупная оценка конкурентоспособности ПП разработчика по сравнению с аналогичными ПП как взвешенная сумма отдельных показателей из этой группы:

$$K = \sum_{i=1}^n d_i \cdot Q_i, \quad (3)$$

где d_i – относительная важность влияния i -го показателя на конкурентоспособность ПП;

n – количество показателей в группе.

3. Вычисление относительных совокупных оценок конкурентоспособности ПП по сравнению с аналогичными продуктами [4]:

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ



Рис. 1. Обобщенная схема прогностической оценки конкурентоспособности программного продукта

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ



Рис. 2. Способы минимизации риска создания программного продукта, не обладающего конкурентными преимуществами

где K_{III} – групповой показатель потребительских предпочтений проекта относительно ПП конкурента.

Учет представленных показателей позволяет оценить величину проектного риска, заключающегося в упущенных возможностях по созданию ПП, не обладающего явными конкурентными преимуществами.

На современном этапе развития теории и практики программной инженерии данный риск может быть существенно уменьшен. Указанный вывод опирается на результаты когнитивного анализа проектного риска, выполненного ранее с использованием нечетких когнитивных карт [5].

Под проектным риском понимается потенциальная, численно измеримая возможность реализации неблагоприятных ситуаций и связанных с ними последствий в виде потерь (ущерба, убытков) ожидаемой прибыли, в связи с неопределенностью, то есть со случайным изменением условий проектной деятельности, неблагоприятными, в том числе форс-мажорными обстоятельствами, общим падением цен на рынке [2, 3].

1) технический уровень/совокупная стоимость владения:

$$K_1 = \frac{K_{IV}}{K_9}, \quad (4)$$

где K_{IV} – групповой показатель технического уровня проекта относительно ПП конкурента; K_9 – групповой показатель совокупной стоимости владения;

2) потребительские предпочтения/совокупная стоимость владения:

$$K_2 = \frac{K_{III}}{K_9}, \quad (5)$$

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

В общем случае проектный риск R вычисляется по формуле [3]:

$$R = P \cdot q, \quad (6)$$

где P – вероятность рискованного события;
 q – величина ущерба.

Чаще всего под рискованном событием понимается реализация угрозы. Вероятность реализации угрозы принимает значения в интервале [0; 1] и определяется на основе статистических, вероятностных, экспертных других методов [3, 5, 8].

Использование методики прогностической оценки риска создания неконкурентоспособного ПП позволит уже на ранних этапах проектирования выявлять «критические элементы» в существующей системе управления проектом. С опорой на результаты анализа факторов риска выбирают рациональные способы его компенсации (рисунк 2). Во многих случаях положительного эффекта можно добиться путем косвенного воздействия на дестабилизирующие факторы за счет рационального использования ресурсов и инновационного потенциала организации и обоснования стратегии оперативного управления проектом на различных стадиях его реализации.

Выводы

1. Проблема обеспечения конкурентоспособности программных продуктов, созданных отечественными разработчиками, носит комплексный междисциплинарный характер и имеет несколько аспектов: научно-методологический, технологический, экономический, маркетинговый и управленческий.

2. Наиболее критичными по степени влияния на создание конкурентных преимуществ отечественного ПП в настоящее время являются вопросы рациональной организации и обеспечения согласованной работы над проектом всех категорий специалистов: математиков, архитекторов, постановщиков задач, программистов. В

этой связи приоритетной является задача разработки корпоративной электронной среды с полным набором инструментальных средств для эффективного управления проектом.

3. Основу инструментария механизма управления проектом по созданию ПП должны составить прогностические модели проектного риска и методики когнитивного анализа и оценки показателей его конкурентоспособности на различных стадиях проектирования.

Литература

1. Биглова А.А. Основы предпринимательской деятельности. Уфа, 2014. 150 с.
2. Ивасенко А.Г., Никонова Я.И., Сизова А.О. Управление проектами. Новосибирск, 2007. 177 с.
3. Надеждин Е.Н., Шаранов Д.А. Современные подходы к проблеме анализа проектной эффективности перспективных средств защиты информации // Научное обозрение, технические науки, 2018. №4. С.14-22.
4. Ехлаков Ю.П., Янченко Е.А. Методика оценки конкурентоспособности прикладных программных продуктов // Бизнес-информатика. 2011. №3(17). С.10-15.
5. Надеждин Е.Н. Нечеткая когнитивная модель механизма обеспечения конкурентоспособности программного продукта // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific Journal, 2016 (January-February). №1-2. P.13-19.
6. Голубков Е.П. Предплановые маркетинговые исследования и стратегический анализ // Маркетинг в России и за рубежом, 2008. №2. С.106-125.
7. Астахов А.М. Искусство управления информационными рисками. М.: ДМК Пресс, 2010. 312 с.
8. Панягина А.Е. Обзор современных методов количественной оценки рисков // Экономика и менеджмент инновационных технологий, 2014. №3. Ч.1. URL: <http://ekonomika.snauka.ru/2014/03/3966> (дата обращения: 23.09.2018).



ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 355(07), 614.812(07)

ОПЕРАТИВНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ МЕРОПРИЯТИЙ РХБ- ЗАЩИТЫ СПЕЦИАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

ONLINE OPTIMIZATION OF TIME PARAMETERS OF RADIATION, CHEMICAL AND BIOLOGICAL PROTECTION FOR SPECIAL OBJECTS

Олег Юрьевич Иващенко

начальник факультета
филиал ВА РВСН имени Петра
Великого (г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел. +7(985)729-0194
E-mail: varvsn-serp@mil.ru

Аннотация

Решена задача оптимизации времени выполнения мероприятий радиационной, химической и биологической защиты (РХБЗ) специальных объектов. Проведена систематизация исходных данных, характеризующих полноту и оперативность выполнения указанных мероприятий. Обоснованы ограничения по времени обучения специалистов. В отличие от известных подходов, предлагаемый дополнительно учитывает закономерности, характеризующие процесс освоения специалистами навыков выполнения мероприятий РХБЗ. Приведен числовой пример, иллюстрирующий разработанный подход к оптимизации параметров времени.

Ключевые слова: радиационная, химическая и биологическая защита, специальный объект, временные параметры, кривая научения, оптимизация.

Summary

The problem of optimal estimation of time parameters of radiation, chemical and biological protection (RCBP) for special objects is solved. Systematization of the initial data of performance efficiency is carried out for the problem solving. Time constraints for education of RCBP-specialist are proved. Unlike the known approaches, offered considers in addition the characteristics of skills forming for RHBZ personal. The numerical example illustrates the suggested approach for optimization of time parameters is given.

Keywords: radiation protection, chemical and biological protection, special object, time parameters, learning curve, optimization.

Введение

Одним из условий нормального функционирования специальных объектов является обеспечение их радиационной, химической и биологической защиты (РХБЗ) [1]. Она реализуется посредством комплекса мероприятий, к основными из которых отнесем: оповещение о РХБЗ, использование средств индивидуальной и-или коллективной защиты, частичная или полная специальная обработка людей и техники, обеззараживание специальных объектов, приме-

нение радиопоглощающих материалов [2-4]. Организация и выполнение этих мероприятий возлагается на руководителей специальных объектов [1, 5]. Она предусматривает, в частности, рациональное распределение материальных и временных ресурсов для достижения требуемых показателей полноты и оперативности выполнения мероприятий РХБЗ, а также уровня подготовки специалистов.

Дальнейшее повышение качества РХБЗ в значительной степени зависит от параметров,

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

определяющих время выполнения каждого мероприятия. Они обычно задаются заблаговременно (на этапе планирования мероприятий РХБЗ) исходя из предполагаемых особенностей поражающих факторов, интенсивности воздействия, условий обстановки, требуемых объемов работ, доступных средств и методов РХБЗ [3-5]. Объективные различия между предположенными и фактическими исходными данными требуют оперативного перепланирования (коррекции) параметров мероприятий РХБЗ в условиях дефицита времени и материальных ресурсов для минимизации потерь людей и материального ущерба. Общее решение этой задачи и составляет основное содержание данной работы. Оперативное нахождение оптимальных временных параметров мероприятий РХБЗ на практике позволит обоснованно корректировать (планировать) их сроки проведения для снижения потерь людей и техники.

В статье решена задача оперативной оптимизации времени, отводимого на выполнение основных мероприятий РХБЗ, в ходе организации РХБЗ специальных объектов. В качестве исходных данных привлекаются параметры полноты и оперативности выполнения указанных мероприятий. Они традиционно используются и при формировании комплексных критериев качества РХБЗ специальных объектов [6-8]. Новизна предлагаемого подхода определяется дополнительным учетом закономерностей, характеризующих процесс научения специалистов, выполняющих мероприятия РХБЗ [10, 11]. Обоснованы основные этапы оперативной оптимизации временных параметров мероприятий РХБЗ специальных объектов. Приведен числовой пример, иллюстрирующий возможности разработанного подхода.

Постановка задачи

В решаемой задаче необходимо математически определить мероприятия, специальные объекты и их связь с комплексным показателем качества РХБЗ. Каждое i -е мероприятие (основные их них перечислены выше, $i = 1..k$) на j -м специальном объекте, $j = 1..n$, будем характеризовать следующими параметрами, для которых введем соответствующие обозначения:

- показатель $t_{i,j}^{TP}$ требуемой оперативности выполнения мероприятия;
- расчетное время $t_{i,j}^P$ выполнения мероприятия;
- показатель t_i^H , характеризующий темп научения специалистов выполнению мероприятия РХБЗ;
- требуемая полнота $0 \leq Q_{i,j}^{TP} \leq 1$ выполнения мероприятия, $Q_{i,j} \approx 1$;
- фактическая или планируемая полнота $0 \leq Q_{i,j}^B \leq 1$;

● необходимое число специалистов $N_{i,j}^{TP}$ для выполнения мероприятия;

● фактическое число $N_{i,j}^P$ подготовленных специалистов для выполнения i -го мероприятия;

● весовой коэффициент $0 \leq W_j \leq 1$, характеризующий важность j -го специального объекта в соответствии с комплексным показателем качества;

● показатель $0 \leq D_j^{\max} \leq 1$ максимально допустимых предотвращенных потерь;

● собственный коэффициент $0 \leq K_j^P \leq 1$ реализации возможностей системы защиты j -го специального объекта.

Все указанные исходные данные могут быть получены из нормативных документов по РХБЗ специальных объектов, а также определены опытным путем по результатам учений и-или тренировок в выполнении мероприятий РХБЗ [3, 4, 7, 8]. Показатели t_i^H темпов научения выполнению специалистами мероприятий РХБЗ носят объективный характер [10, 11] и могут быть получены, например, из соответствующих учебных программ и планов, например, [12].

Введенные параметры могут принимать различные значения в зависимости от конкретного i -го мероприятия (на всех специальных объектах), j -го объекта, либо одновременно мероприятия и объекта. При этом различные мероприятия РХБЗ специальных объектов, как правило, характеризуются разными весовыми коэффициентами W_j их важности. Общее число объектов и проводимых мероприятий РХБЗ может быть велико, поэтому для упорядочения исходных данных задачи удобно представить их в форме таблицы (см. таблицу 1).

Исходные данные, относящиеся ко второму и последующим мероприятиям, дополняют таблицу соответствующими столбцами (здесь они опущены для сокращения записи). Выполнение произвольного i -го мероприятия на j -м специальном объекте сопряжено с различными затратами времени при заданных значениях исходных данных. Общее время на выполнение мероприятий РХБЗ, которое обозначим T_c , на практике ограничено притом, что влияние показателя выполнения различных мероприятий на качество РХБЗ специального объекта также различно. С учетом этого объективно существует возможность повышения качества РХБЗ путем рационального распределения времени, отводимого на выполнение каждого мероприятия на специальных объектах. Нахождение оптимальных параметров времени мероприятий РХБЗ при ограничениях на общее время их выполнения и составляет основное содержание

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Таблица 1

Исходные данные задачи оптимизации временных параметров мероприятий РХБ-защиты специальных объектов (пример формирования для одного мероприятия)

Название объекта	Тип объекта	W_j	K_j^P	D_j^{\max}	1-е мероприятие						
					$t_{i,j}^{TP}$	$t_{i,j}^P$	t_i^H	$Q_{i,j}^{TP}$	$Q_{i,j}^B$	$N_{i,j}^{TP}$	$N_{i,j}^{\Pi}$
Объект 1	1	1	1	0,9	3	3	120	1	0,9	12	11
Объект 2	1	1	0,9	0,9	3	3	120	1	0,9	15	1
Объект 3	2	0,8	1	0,9	10	10	360	1	0,9	33	29
Объект 4	2	0,8	1	0,8	11	11	360	1	0,8	38	35
и т.д.	2	0,9	0,9	0,8	11	20	420	1	0,9	36	30

рассматриваемой задачи. Ее решение предполагает формализацию критерия качества РХБЗ и ограничений на искомые временные параметры.

Показатель качества решения задачи РХБЗ специальных объектов

В соответствии с целями РХБЗ [1-3] могут быть обоснованы различные критерии качества решения задач. Наиболее часто в качестве такого критерия обосновывается использование ожидаемого сохранения функциональных возможностей специального объекта при реализации мероприятий РХБЗ:

$$M = \sum_{i=1}^{n_1} K_i^P K_i^{OB} \cdot \sum_{j=1}^{n_2} K_j^P K_j^{OB} \cdot \sum_{k=1}^{n_3} K_k^P K_k^{OB}, \quad (1)$$

где n_1, \dots, n_3 – число специальных объектов 1...3-го типов;

$K_a^{OB} = 1 - \exp(-9,8D_a^{\Pi})$ – коэффициент обеспечения функционирования по назначению q -го специального объекта, $q = \{i, j, k\}$;

$D_q^{\Pi} = D_q^{\max} \sum_{p=1}^k W_p K_{q,p}$ – предотвращенные в результате выполнения p -го мероприятия РХБЗ потери на q -м специальном объекте;

$K_{q,p} = Q_{q,p} V_{q,p} G_{q,p}$ – качество выполнения p -го мероприятия РХБЗ на q -м специальном объекте;

$G_{q,p} = N_{q,p}^{\Pi} / N_{q,p}^{TP}$ – показатель подготовленности специалистов к выполнению p -го мероприятия РХБЗ на q -м специальном объекте;

$Q_{q,p}$ и $V_{q,p}$ – соответственно, полнота и оперативность выполнения p -го мероприятия РХБЗ на q -м специальном объекте:

$$Q_{q,p} = \begin{cases} 1 & \text{если } Q_{q,p}^B \geq Q_{q,p}^{TP} \\ Q_{q,p}^B / Q_{q,p}^{TP} & \text{если } Q_{q,p}^B < Q_{q,p}^{TP} \end{cases}, \quad (2)$$

$$V_{q,p} = \begin{cases} 1 & \text{если } t_{q,p}^{TP} \geq t_{q,p}^P \\ 1 - \exp(-2,3 t_{q,p}^P / t_{q,p}^{TP}) & \text{если } t_{q,p}^{TP} < t_{q,p}^P \end{cases}. \quad (3)$$

Приведенный показатель качества используем в качестве целевой функции при решении задачи нахождения оптимальных параметров времени выполнения мероприятий РХБЗ.

Нахождение оптимальных оценок временных параметров мероприятий РХБ-защиты специальных объектов

Показатель качества решения задачи РХБЗ (1) зависит, в частности, от подготовленности специалистов к выполнению мероприятий РХБЗ, которая может быть повышена только путем обучения. Зависимость результативности от времени обучения выполнения какого-либо действия носит объективный характер. Математически она представляется различными аналитическими функциями, получившими названия кривых научения (КН). Они позволяют количественно оценить время, которое понадобится человеку для достижения требуемого уровня показателей при выполнении некоторой работы [10, 11].

Стандартная КН показана на *рисунке 1* и характеризуется различной результативностью и скоростью обучения в разные моменты времени.

Скорость научения существенно зависит от сложности осваиваемого навыка и может меняться во времени из-за влияния многих других факторов. Все это определяет различные виды используемых КН. В решаемой задаче для математического представления КН используем экспоненциальную зависимость вида (см. *рисунк 1*):

$$H(t) = H_M - (H_M - H_0) \exp(-t/t_i^H), \quad (4)$$

где H_0, H_M – соответственно, начальный и максимально достижимый уровень обучения специалиста, которые для определенности положим равными 0,5 и 1.

При необходимости уровни обучения могут быть включены в состав исходных данных решаемой задачи. Значения показателя t_i^H , характеризующего скорости научения, могут быть получены из существующих программ и планов

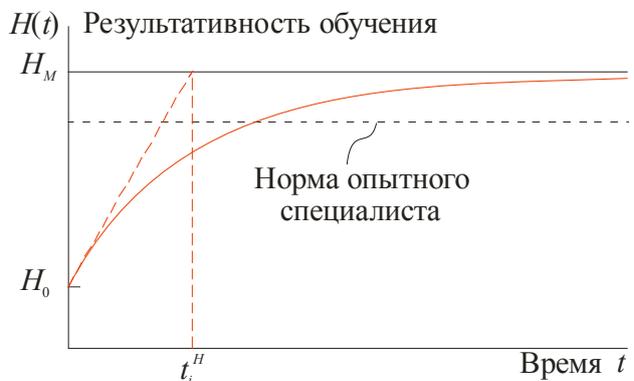


Рис. 1. Вид кривой научения, используемой в решении задачи нахождения оптимальных оценок временных параметров мероприятий РХБЗ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

подготовки специалистов к выполнению i -го конкретного мероприятий РХБЗ [12]. Формула (4) используется далее в показателе подготовленности специалистов к выполнению мероприятий РХБЗ на специальных объектах.

При фиксированном ресурсе времени T_C задача распределения времен $t_1 \dots t_k$, отводимых на обучение специалистов выполнению k различных мероприятий РХБЗ, дополняется ограничением:

$$t_1 + t_2 + \dots + t_k = T_C. \quad (5)$$

По физическому смыслу искомые оценки являются неотрицательным, что формализуется ограничениями в форме неравенств:

$$t_1 \geq 0, \dots, t_k \geq 0. \quad (6)$$

Если время выполнения некоторого i -го мероприятия зависит от j -го специального объекта, аналогичное ограничение примет вид:

$$\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n t_{i,j} = T_C. \quad (7)$$

В общем случае ограничения в форме равенств могут быть легко сформированы не только для временных, но и для иных параметров РХБЗ специальных объектов. Например, минимизация затрат на обучение возможна с использованием ограничения вида:

$$t_1 \cdot c_1 + \dots + t_k \cdot c_k = C, \quad (8)$$

где $c_1 \dots c_k$ и C – соответствующие «стоимостные» показатели. Далее без ограничения общности будем рассматривать только задачу нахождения оптимальных параметров времени.

Таким образом, оптимальные оценки параметров времени выполнения мероприятий РХБЗ специальных объектов могут быть найдены путем максимизации целевой функции (1)-(3), при ограничениях в форме равенств односторонних неравенств (5)-(8). При этих обстоятельствах в качестве вычислительного метода может быть использован, например, метод множителей Лагранжа [13]. Однако в силу нелинейной зависимости целевой функции от искомых параметров, практически целесообразным является использование одного из численных методов для нахождения оценок параметров времени [14], широко распространенных сегодня в оптимизационных пакетах прикладных программ для ПЭВМ.

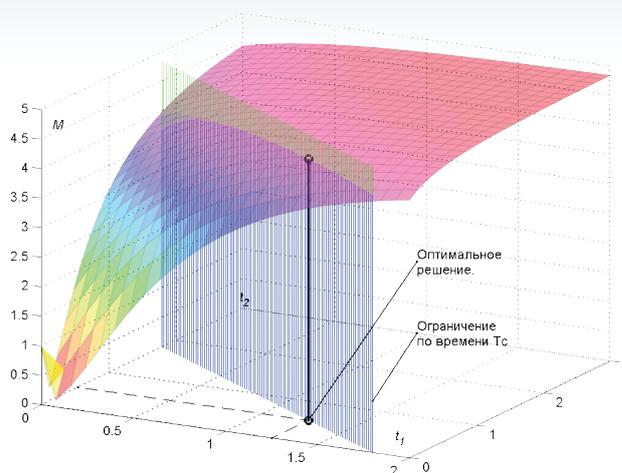


Рис. 3. Графическая иллюстрация результатов нахождения оптимальных оценок параметров времени

Числовой пример оптимизации времен выполнения мероприятий РХБ защиты специальных объектов

Предложенное решение реализовано в виде программы для ПЭВМ, результаты работы которой приводятся ниже. Числовой пример содержит упрощение, состоящее в том, что искомыми являются только два параметра – продолжительности t_1 и t_2 обучения специалистов выполнению 1-го и 2-го мероприятий РХБЗ, соответственно. Исходные данные, вводимые в специальную форму оператором для использования их в расчетах, приведены на рисунке 2.

На рисунке 3 представлена графическая иллюстрация решения задачи. Целевая функция (1) показана возрастающей зависимостью аргументов времени t_1 и t_2 обучения (в исходных данных на рисунке 2 параметры, подлежащие нахождению, отмечаются оператором с помощью символа «?»). Вертикальная плоскость соответствует ограничению (5).

Оптимальное решение является максимальным значением неявной зависимости, образованной пересечением поверхности целевой функции и плоскости. Решением задачи являются оценки времени обучения специалистов выполнению 1 и 2-го мероприятий РХБЗ: $t_1 = 1,25$ ч ($\approx 70\%$ от общего ресурса времени $T_C = 1,8$ ч) и $t_2 = 0,55$ ч ($\approx 30\%$). Из рисунка 3 видно также, что отсутствуют значения целевой функции M , пре-

Объекты	Тип объекта	Общ. параметры		1-е мероприятие								2-е мероприятие							
		Dmax	Kp	Wj1	Qtr1	Qv1	ttr1	tras1	Ntr1	Npg1	tN1	Wj2	Qtr2	Qv2	ttr2	tras2	Ntr2	Npg2	tN2
СКП	1	0,91	0,9	1	0,99	0,89	1	0,9	5	4	1	1	0,98	0,88	3	2,3	5	4	3
ПКП	1	0,82	0,9	1	0,99	0,89	1	0,9	5	4	1	1	0,98	0,88	3	2,4	5	4	3
ГПП1	2	0,91	0,9	1	0,99	0,89	2	0,8	10	8	2	1	0,98	0,88	4	4,1	10	8	5
ГПП2	2	0,82	0,9	1	0,99	0,89	2	0,8	10	9	2	1	0,98	0,88	4	3,2	10	9	5
ГПП3	2	0,83	0,9	1	0,99	0,89	2	0,8	10	10	2	1	0,98	0,88	4	3,8	10	10	5
Ресурс времени		1,8		*	*	*	*	*	*	*	?	*	*	*	*	*	*	*	?

Рис. 2. Таблица Excel®-файла оператора с исходными данными

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

вышающие максимальное ее значение в точке оптимума. Это подтверждает на качественном уровне эффект от применения разработанного подхода.

Аналогично находятся оптимальные оценки времени обучения специалистов при большем числе мероприятий РХБЗ и специальных объектов. Они могут быть непосредственно использованы в целях обоснования решений по организации РХБЗ специальных объектов.

Заключение

Рассмотрено общее решение задачи нахождения оптимальных оценок временных параметров мероприятий РХБЗ специальных объектов. Проведена систематизация исходных данных, характеризующих полноту и оперативность выполнения указанных мероприятий, а также приведен комплексный критерий качества решения задачи РХБЗ. В отличие от известных подходов, предлагаемый дополнительно учитывает закономерности, характеризующие процесс освоения специалистами навыков выполнения мероприятий РХБЗ. Приведен числовой пример, иллюстрирующий разработанный подход к оптимизации параметров времени.

Литература

1. Федеральный закон «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» от 21.12.1994 №68-ФЗ.
2. Цель, задачи и мероприятия РХБЗ [Электронный ресурс] Военсервис. – Режим доступа: http://voenservice.ru/boevaya_podgotovka/radiatsionnaya-himicheskaya-i-biologicheskaya-zaschita/tsel-zadachi-i-meropriyatiya-rhbz, свободный. – Загл. с экрана.
3. Козлов В.Н. Радиационная, химическая и биологическая защита: учебное пособие / В.Н. Козлов, В.И. Демидов, Ю.М. Егоров. Серпухов: ФВА РВСН, 2016. 297 с.
4. Защита от оружия массового поражения. Справочник. М.: Воениздат, 1989. 398 с.
5. Методические рекомендации по действиям подразделений РХБ защиты спасательных воинских формирований МЧС России при ликвидации последствий радиационных аварий (Утв. МЧС России 4 мая 2016 г. № 2-4-71-20-14).
6. Иващенко О.Ю., Козлов В.Н. Обоснование

критериев эффективности защиты от поражающих факторов оружия массового поражения // Научно-технический сборник. Серпухов: ФВА РВСН имени Петра Великого, 2017. С.90-91.

7. Иващенко О.Ю. Особенности выполнения мероприятий РХБ защиты подразделений РВСН, оснащенных ПГРК / XXXVI Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем»: сборник трудов. Ч.1. Серпухов: ФВА РВСН имени Петра Великого, 2017. С.53-57.

8. Иващенко О.Ю. Показатели и критерии оценки эффективности системы защиты личного состава ракетной дивизии от поражающих факторов ядерного химического и биологического оружия / О.Ю. Иващенко, В.Н. Козлов // XXXV Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем»: сборник трудов. Ч.2. Серпухов: ФВА РВСН имени Петра Великого, 2016. С.195-199.

9. Военный энциклопедический словарь. М.: Большая российская энциклопедия, 2001. Т.1. 848 с.

10. Армстронг М. Практика управления человеческими ресурсами. 11-е изд. / Пер. с англ. под ред. С.К. Мордовина. СПб.: Питер, 2012. 848 с.

11. Новиков Д.А. Закономерности итеративного научения. М.: Институт проблем управления РАН, 1998. 77 с.

12. Радиационная, химическая и биологическая защита. Тематический план изучения дисциплины «Общевойсковая подготовка», раздел «Радиационная, химическая и биологическая защита» / Нижегородский гос. ун-т им. Н.И.Лобачевского [Текст]. – Режим доступа: http://www.ivo.unn.ru/rhbz/?page_id=659, свободный. – Загл. с экрана.

13. Сейдж Э.П. Оптимальное управление системами / Э.П. Сейдж, Ч.С. Уайт, III; Пер. с англ. Е.Б. Левиной, Ю.С. Шинакова. М.: Радио и связь, 1982. 392 с.

14. Бахвалов Н.С. Численные методы [Электронный ресурс] / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. – 8-е изд. (эл.). – Электрон. текстовые дан (1 файл pdf : 639 с.). – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. ISBN 978-5-9963-2616-7.



ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.056.53

АЛГОРИТМ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ВНЕДРЕНИЯ АУТЕНТИФИКАЦИОННЫХ МЕТОК НА ОСНОВЕ СИГНАЛОВ С РАСШИРЕННЫМ СПЕКТРОМ

THE ALGORITHM FOR INCREASING THE NOISE IMMUNITY OF THE IMPLEMENTATION OF THE AUTHENTICATION LABEL BASED ON SIGNALS WITH AN EXTENDED SPECTRUM



Алексей Викторович Каракашев
аспирант
начальник отдела ЗТСиК
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: 8 (910) 442-18-81
E-mail: lexusnikita@gmail.com

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

Аннотация

Алгоритм повышения помехоустойчивости внедрения аутентификационной метки на основе сигналов с расширенным спектром увеличивает базу сигнала (аутентификационной метки), расширяет его спектр на передаче. Энергия помехи также «размазывается» по спектру. Приемник же выполняет сжатие спектра таким образом, что вся энергия сигнала оказывается сосредоточенной в узкой полосе, тогда как удельный вес помехи в ней оказывается незначительным. Применение такого алгоритма позволяет достичь выигрыша в отношении сигнал/помеха в L раз, где L – коэффициент расширения спектра.

Ключевые слова: стеганография, аутентификационная метка, ортогональные сигналы, помехозащищенность, изображение, сигналы с расширенным спектром.

Summary

The algorithm for increasing the noise immunity of the implementation of the authentication label based on signals with an extended spectrum increases the base of the signal (authentication label), expands its spectrum on the transmission. The interference energy is also «smeared» across the spectrum. The receiver compresses the spectrum in such a way that all the signal energy is concentrated in a narrow band, while the specific gravity of the noise in it is insignificant. The application of this algorithm allows to achieve a gain in the signal/noise ratio at L times where L is the coefficient of spectrum expansion.

Keywords: Steganography, authentication label, orthogonal signals, noise immunity, image, spread spectrum signals.

Введение

Суть алгоритма повышения помехоустойчивости внедрения аутентификационной метки на основе сигналов с расширенным спектром состоит в увеличении базы сигнала (аутентификационной метки), расширении его спектра на передаче. Энергия помехи также «размазывается» по спектру. Приемник же выполняет сжатие спектра таким образом, что вся энергия сигнала оказывается сосредоточенной в узкой полосе, тогда как удельный вес помехи в ней оказывается незначительным. Применение такого алгоритма позволяет достичь выигрыша в отношении сигнал/помеха в L раз, где L – коэффициент расширения спектра [1].

В качестве показателя эффективности применения сигналов с расширенным спектром в сте-

госистемах с аутентификационной меткой (АМ) используется не выигрыш в отношении сигнал/помеха, а средний коэффициент битовой ошибки (вероятность битовой ошибки) в принятой АМ [1].

Средний коэффициент битовой ошибки объединяет важные показатели качества радиосвязи, которыми должна обладать стегосистема с АМ: помехоустойчивость (достоверность) и безопасность.

Связь коэффициента битовой ошибки с помехоустойчивостью однозначная, а связь с безопасностью связи исследуем на следующем примере.

Безопасность стегосистемы с АМ определяется ее стойкостью к подделке нарушителем. Предположим, что нарушитель знает алгоритм внедрения АМ, но не знает ключа, и у него нет лучшей стратегии, чем случайный перебор раз-

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

личных вариантов АМ. Тогда стойкость стегосистемы будет определяться вероятностью случайной подделки, причем, как правило, у нарушителя имеется одна попытка.

Пусть в изображение внедряется АМ размером 100 бит. Вероятность ее случайной подделки нарушителем – 2^{-100} или $7.9 \cdot 10^{-31}$. Пусть теперь АМ декодирована с коэффициентом ошибки, например, 10^{-1} , то есть в последовательности имеется до 10 ошибок. Согласно формуле Бернулли, вероятность случайной подделки последовательности нарушителем с вероятностью 2^{-100} в одном исходе равна:

$$P = 2^{-100} * \sum_{i=0}^{10} \frac{100!}{(100-i)! * i!}. \quad (1)$$

Расчет показывает, что эта вероятность примерно равна 2^{-56} . Таким образом, если считать допустимой вероятностью декодирования АМ с 10 ошибками, то стойкость и безопасность стегосистемы существенно снижается, хотя и остается высокой. Фактически, «эффективная» длина АМ уменьшается со 100 бит до 56, то есть почти в два раза по сравнению с безошибочным приемом.

Вот почему показатель коэффициента вероятности битовой ошибки в декодированной АМ напрямую связан с безопасностью стегосистемы АМ. Тогда критерием эффективности того или иного алгоритма будем считать минимум коэффициента вероятности битовой ошибки.

Целью работы является разработка алгоритма имитозащиты изображений для передачи по радиоканалу в условиях помех. Структурная схема алгоритма внедрения изображена на рисунке 1.

На первом шаге алгоритма обозначим последовательность информационных бит АМ в полярном коде, как w_j :

$$w_j, w_j \in \{-1, 1\}, \quad 1 < j \leq 100 \quad (2)$$

На втором шаге алгоритма этот дискретный сигнал «расширяется» в L раз, в результате чего получается последовательность b_i :

$$b_i = w_j, \quad (j-1)L < i < jL \quad (3)$$

На третьем шаге алгоритма эта последовательность умножается на адаптивно выбираемые множители a . Масштабирующий множитель a_i находится в зависимости от локальных свойств

изображения. При его выборе должны учитываться свойства системы человеческого зрения.

На четвертом шаге последовательность b_i модулируется псевдослучайной последовательностью c :

$$c_i, \quad i=1 \dots 100L, \quad (4)$$

назначением которой является расширение спектра АМ.

На пятом шаге алгоритма модулированный сигнал, или АМ, складывается с сигналом изображения

$$x'_i = x_i + a_i b_i c_i \quad (5)$$

и далее отправляется в радиоканал связи.

В силу псевдослучайной природы сигнала c_i , АМ также является псевдослучайной и ее трудно обнаружить, как визуальными, так и статистическими методами. Существует бесконечно много псевдослучайных последовательностей c .

Общим требованием к последовательностям является требование ортогональности. За счет него к изображению могут быть добавлено несколько АМ, каждая модулированная своей последовательностью. Извлечение каждого из АМ будет выполняться независимо от другого и в произвольном порядке.

Демодуляция АМ выполняется корреляционным приемником, в котором пиксели стегоизображения умножаются на тот же псевдослучайный сигнал, что и в кодере, и далее результат суммируется по всем отсчетам, содержащим АМ [1]:

$$s_j = \sum_{i=(j-1)L+1}^{jL} c_i \cdot y'_i = \underbrace{\sum_{i=(j-1)L+1}^{jL} c_i \cdot x'_i}_{\Sigma_1} + \underbrace{\sum_{i=(j-1)L+1}^{jL} c_i \cdot c_i \cdot \alpha_i \cdot b_i}_{\Sigma_2}. \quad (6)$$

Здесь суммы Σ_1 и Σ_2 отражают вклад в корреляционную сумму фильтрованного изображения и фильтрованной АМ, соответственно. Предположим, что изображение полностью отфильтровано фильтром верхних частот (ФВЧ), то есть Σ_1 равна нулю, а на АМ фильтр верхних частот не повлиял, то есть сумма Σ_2 после фильтрации примерно равна сумме Σ_2 до фильтрации ($c_i \alpha_i b_i \approx c_i \alpha_i b_i$). Тогда корреляционная сумма будет равна $\sum_{i=(j-1)L+1}^{jL} c_i^2 \cdot \alpha_i \cdot b_i = a_i \cdot \sigma_c^2 \cdot L \cdot \text{mean}(\alpha_i)$, (7)

$$s_j \approx \sum_{i=(j-1)L+1}^{jL} c_i^2 \cdot \alpha_i \cdot b_i = a_i \cdot \sigma_c^2 \cdot L \cdot \text{mean}(\alpha_i), \quad (7)$$

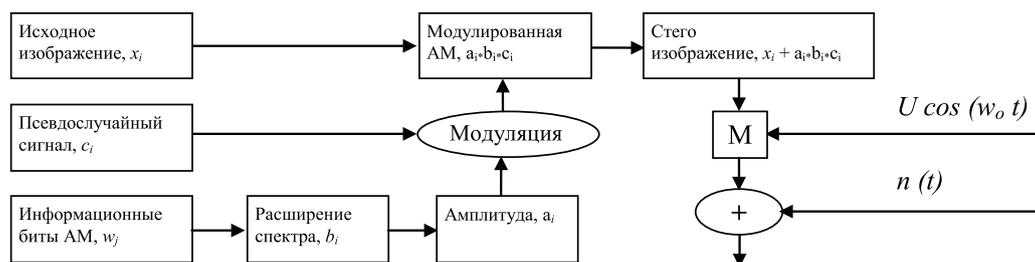


Рис. 1. Структурная схема алгоритма

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

где σ_c^2 – дисперсия псевдослучайной последовательности. Знак корреляционной суммы есть внедренный бит информации a_i , так что информация извлекается без потерь. При этом возможна ситуация, когда корреляционная сумма равна нулю и происходит стирание.

Описанный выше метод извлечения АМ не требует наличия у декодера исходного изображения, то есть является «слепым».

На практике предположение о том, что ВЧ фильтрация мало влияет на АМ является справедливым при достаточной энергии сигнала, а предположение о том, что изображение полностью отфильтровано ВЧ фильтром не выполняется, поскольку изображения обычно низкочастотные ($\Sigma_i \neq 0$). Необходимо учитывать влияние этой суммы, поскольку она снижает помехоустойчивость. Ошибка в извлечении информационного бита АМ возникнет, если корреляционная сумма будет противоположна по знаку сумме АМ, то есть

$$\text{sign}(\Sigma_1 + \Sigma_2) \neq \text{sign}(\Sigma_2),$$

то есть $\text{sign}(\Sigma_1) \neq \text{sign}(\Sigma_2)$ при $|\Sigma_1| > |\Sigma_2|$. Оценим зависимость вероятности возникновения такого события от параметров алгоритма внедрения АМ и используемых сигналов.

Сигнал АМ умножается почленно на псевдослучайный сигнал. Матожидание произведения равно нулю, а дисперсия

$$\sigma^2 = \sigma_c^2(\sigma_v^2 + \mu_v^2).$$

Это произведение суммируется L раз. Если L – достаточно большое, то, в соответствии с центральной предельной теоремой, плотность распределения вероятностей суммы стремится к нормальному распределению с нулевым матожиданием и дисперсией

$$L\sigma_c^2(\sigma_v^2 + \mu_v^2).$$

Ошибка в определении бита возникнет, если информационный бит был +1, а

$$\Sigma_1 < -\sigma_c^2 L \text{mean}(a_i),$$

или если бит был равен -1, а

$$\Sigma_1 > -\sigma_c^2 L \text{mean}(a_i).$$

Так как сумма описывается нормальным распределением, вероятность ошибки на бит будет равна [1]

$$P_{\text{ош}} = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\frac{\sqrt{\sigma_c^2 L \text{mean}(a_i)}}{\sqrt{2} \sqrt{\sigma_v^2 + \mu_v^2}} \right). \quad (8)$$

Из этого выражения видно, что для уменьшения вероятности ошибки необходимо увеличивать коэффициент расширения L , дисперсию псевдослучайной последовательности σ_c^2 или среднюю амплитуду a_i .

К системам передачи информации с расширенным спектром предъявляются следующие требования [1]:

1. Помехозащищенность.
2. Отсутствие межбитовой интерференции.
3. Энергетическая и структурная скрытность передачи информации.

Эти требования реализуются за счет выбора системы сигналов с расширенным спектром. Они могут быть напрямую перенесены и на стегосистему АМ, использующую сигналы с расширенным спектром. Поэтому рассмотрим желательные свойства этих сигналов.

Пусть $c[n]$ – псевдошумовая последовательность длины N . Она должна в идеале удовлетворять следующим свойствам [1].

1. Иметь нулевое среднее:

$$\sum_{n=0}^{N-1} c[n] = 0,$$

то есть быть сбалансированной.

2. Автокорреляционная функция должна иметь единственный пик:

$$\sum_{n=0}^{N-1} c[n]c[n+k] = N\delta[k], \quad (9)$$

где $\delta[k]$ – дельта-функция;

k – номер счета.

3. Желательно, чтобы возможные реализации псевдослучайной последовательности $c[n]$ были ортогональны друг другу.

По последнему признаку можно выделить два типа псевдошумовых последовательностей: псевдослучайные и ортогональные. Псевдослучайные последовательности (M -последовательности) порождаются генератором на регистрах сдвига с обратной связью [1]. Начальное заполнение регистра является ключом и доступно только законным пользователям. Известно, что при определенной конфигурации отводов регистр сдвига порождает последовательность максимально возможного периода – M -последовательность [1].

Ряд проведенных исследований показывает большую помехозащищенность процедуры внедрения АМ на основе ортогональных сигналов, которая также более устойчива к атакам сдвига [2].

Недостатком внедрения АМ на основе известных ортогональных сигналов является их низкая секретность. В самом деле, множество популярных ортогональных систем сигналов не столь велико, и даже частичное знание ключа внедрения может помочь противнику компрометировать применение стегосистемы [2].

Заключение

Разработанный алгоритм позволяет повысить имитозащиту изображения за счет внедрения АМ на основе ортогональных сигналов в спектральную область изображения.

Литература

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: 2-е изд. Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. 1104 с.
2. Грибунин В.Г., Оков И.Н., Туринцев И.В. Цифровая стенография (Серия «Аспекты защиты»). М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2009. 265 с.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.056.53

**СРАВНЕНИЕ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ
И СТЕГАНОГРАФИЧЕСКИХ МЕТОДОВ
ИМИТОЗАЩИТЫ МУЛЬТИМЕДИЙНОЙ
ИНФОРМАЦИИ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ
ПО РАДИОКАНАЛУ В УСЛОВИЯХ
ПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ**

**A COMPARISON OF CRYPTOGRAPHIC AND
STEGANOGRAPHIC METHODS OF PROTECTION
SYSTEM OF ENCRYPTED COMMUNICATION
FROM IMPOSING FALSE MULTIMEDIA
INFORMATION DURING TRANSMISSION
OVER THE RADIO CHANNEL IN TERMS OF
INTENTIONAL INTERFERENCE**

Вадим Геннадьевич Грибунин

почетный работник науки и техники РФ
доктор технических наук
главный научный сотрудник
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: 8 (4967) 35-31-93
E-mail: v.gribunin@iifmail.ru

Сергей Владимирович Шеламов

кандидат технических наук
заместитель начальника отдела
ФГБУ 4 ЦНИИ МО РФ
Адрес: 141091, Московская обл., г. Королёв,
мкр. Юбилейный, ул. М.К. Тихонравова, д. 29
Тел.: 8 (977) 444-36-02

Алексей Викторович Каракашев

аспирант
начальник отдела ЗТСиК
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: 8 (910) 442-18-81
E-mail: lexusnikita@gmail.com

Аннотация

Среди всех достоинств криптографических методов защиты информации есть существенный недостаток – эти методы предъявляют высокие требования к помехозащищенности используемого канала связи. Это приводит к необходимости использования сложных способов модуляции и кодирования в каналах связи. При этом стеганографические методы допускают некоторые искажения в заверенном сообщении, вызванные ошибками канала связи или обработкой сообщения пользователем.

Ключевые слова: криптографические методы, стеганографические методы, радиоканал, изображение, аутентификационная метка.

Summary

Among all the advantages of cryptographic methods of information security there is a significant drawback – these methods have high requirements for the quality of the communication channel. This leads to the need to use complex methods of modulation and coding in the communication channels. In this case, steganographic methods allow some distortion in the certified message caused by errors in the communication channel or message processing by the user.

Keywords: Cryptographic methods, steganographic methods, radio channel, image, authentication label.

Введение

В настоящее время передача мультимедийных сообщений ведется в цифровом виде, потому что обработка фото и видео в цифровом виде имеет большое количество преимуществ перед аналоговой обработкой. Однако существует одно свойство цифровой обработки, способное перечеркнуть многочисленные достоинства – легкость модификации, подделки содержания мультимедийных сообщений, а также его копирования. Для защиты от этой угрозы предлагается применять средства имитозащиты фото-ви-

деоданных. Традиционно такие средства строятся на базе криптографических методов [2].

Имеется много достоинств криптографических методов, однако есть существенный недостаток – эти методы предъявляют высокие требования к помехозащищенности используемого канала связи, «работают» только при отсутствии ошибок в нем. Это приводит к необходимости использования сложных и громоздких способов модуляции и кодирования в каналах связи, но даже они не всегда способны обеспечить безошибочную передачу [1]. Радиоканалы, по которым

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ведется передача изображений с борта летательного аппарата, характеризуются обычно высоким коэффициентом вероятности битовой ошибки (10⁻²–10⁻¹), а также их группированием [2].

Вместе с тем, безошибочная передача не требуется для мультимедийных сообщений, в том числе видео. Например, замена одного пикселя обычно незаметна на изображении, а криптографические методы защиты с искаженным изображением работать уже не будут. Поэтому можно ввести понятие допустимой погрешности. Количественно искажение изображений принято выражать величиной пикового отношения сигнал/шум (энергии изображения к энергии шума). Глаз человека обычно не воспринимает искажения при пиковом отношении сигнал/шум, большим 35 дБ. Для дешифровщика изображений в системе воздушной разведки могут оказаться допустимыми и более сильные искажения, так как его в первую очередь интересует наличие/отсутствие тех или иных объектов на изображении.

Целью работы является анализ особенностей криптографических и стеганографических методов имитозащиты для разработки алгоритма имитозащиты изображений, способного работать в условиях преднамеренных помех в каналах связи. Для решения задачи имитозащиты методы стеганографии потенциально обладают высокой помехоустойчивостью.

Для имитозащиты применяется технология внедрения аутентификационных меток (АМ). Суть защиты заключается в следующем. Вначале в изображение в соответствии с некоторым алгоритмом внедряются АМ. Под внедрением понимается изменение изображения в соответствии с АМ. Это изменение должно быть незначительным, чтобы не исказить изображение. Величина допустимого искажения, как и используемая метрика для его оценки, зависит от приложения. Например, при дешифровке изображений аэрофотосъемки целесообразно использовать такой критерий, как вероятность распознавания объектов. Чаще всего применяется уже упоминавшийся критерий пикового отношения сигнал/помеха при фиксированной ошибке приема изображения.

Стегосистема имитозащиты должна быть стойкой в том смысле, что нарушителю было бы трудно сформировать защищенное изображение. Стойкость, или имитостойкость, обычно определяется следующим образом. Рассмотрим два типа нарушителя. Первый из них не знает ничего об используемых алгоритмах защиты, форматах кадра и т.д., второй обладает полным знанием всех деталей алгоритмов, кроме используемого ключа внедрения. Стегосистема

называется абсолютно имитостойкой, если вероятность формирования защищенного изображения нарушителем второго типа не превосходит вероятности формирования защищенного изображения нарушителем первого типа. Стегосистема называется имитостойкой в вычислительном смысле, если вычислительные возможности нарушителя (число операций в секунду, объем используемой памяти) считаются ограниченными.

Изображение, в которое внедряется АМ, называется контейнером. Имитозащищенное изображение называется стего [2]. Для удостоверения подлинности применяется алгоритм извлечения АМ из изображения. В случае, если извлеченная АМ совпадает с требуемой, делается вывод о подлинности изображения. Извлеченная АМ может не полностью совпадать с требуемой. Тогда нужно говорить о вероятности того, что принятое изображение подлинное.

Рассмотрим упрощенный пример. Пусть в 24-битное изображение размером 10x10 пикселей внедрена АМ размером 100 бит и известно, что модификации подвергались только младшие биты пикселей. Количество возможных вариантов 100-битовых последовательностей равно 2¹⁰⁰ ≈ 10³⁰. Значит, вероятность случайного формирования нарушителем нужной АМ равна 10⁻³⁰. Пусть в принятой АМ имеется 10 ошибок. 10 ошибок могут быть размещены в 100 битах

$$\frac{100!}{10!(100-10)!} \approx 1,73 \cdot 10^{13}$$

способами. Тогда вероятность случайного формирования нарушителем подлинной АМ равна с 10 ошибочными битами равна

$$1,73 \cdot 10^{13} / 10^{30} \approx 1,73 \cdot 10^{-17},$$

что достаточно мало. Таким образом, даже если в принятой АМ 10 бит из 100 ошибочны, можно говорить о подлинности принятого изображения.

В качестве АМ может выступать как случайная двоичная последовательность, так и последовательность, образующая некоторый узор, например, логотип фирмы [2]. В последнем случае тем более возможен прием АМ с погрешностью – человек, выполняющий анализ подлинности все равно будет способен разглядеть требуемый узор. Как правило, в изображение внедряется не сама АМ, а модулированная ею последовательность.

Преимущества стеганографических методов имитозащиты изображений перед криптографическими методами можно выявить, проведя сравнение двух подходов.

Известны и широко изучены два подхода к

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

обеспечению имитозащиты на основе криптографических методов: использование имитовставки и применение электронной цифровой подписи. Процедура вычисления имитовставки описана, например, в ГОСТ 28147-89 [3], а процедура вычисления электронной цифровой подписи – в ГОСТ 34.10-2012 [4]. Также возможно обеспечение имитозащиты на основе анализа самого сообщения.

Сравним эти подходы с имитозащитой на основе стеганографических методов (таблица 1).

Анализ *таблицы 1* позволяет сделать выводы:

1. Имитозащита изображений на основе криптографических методов позволяет обеспечить защиту с использованием сертифицированных алгоритмов; не зависит от различных типов мультимедийных сообщений;

2. При этом имитозащита изображений на основе криптографических методов не позволяет защитить информацию от несанкционированного копирования; не позволяет защитить имитовставку или ЭЦП от удаления из сообщения;

Таблица 1. Сравнение методов имитозащиты мультимедийной информации

Параметр	На основе имитовставок	На основе цифровых подписей	На основе стеганографии	На основе анализа самого сообщения
Модель нарушителя	Нарушитель только внешний (свои не обманывают)	Наряду с внешним нарушителем могут обманывать и отправитель, и получатель сообщений	В зависимости от типа системы нарушитель или только внешний, или все не доверяют всем	Нарушитель только внешний
Устойчивость к удалению аутентификатора заверенного сообщения без разрушения самого сообщения	Отсутствует, имеется в способах на основе шифров с обратной связью	Отсутствует в системах с приложением ЦП к сообщению	Высокая устойчивость	Высокая устойчивость
Обнаружение несанкционированного копирования сообщений	Не обеспечивается	Не обеспечивается	Обеспечивается в ряде систем	Не обеспечивается
Зависимость методов защиты от характеристик заверяемого сообщения	Не зависит	Не зависит	Сильная зависимость	Полная зависимость
Согласованная с методом защиты модель источника сообщения	Бернуллиевский источник	Бернуллиевский источник	Источник с существенными статистическими зависимостями и памятью	Источник с существенными статистическими зависимостями и памятью
Возможность ограниченной погрешности сообщения без потери подлинности	Отсутствует	Отсутствует	Имеется в широких пределах	Имеется
Допустимость ошибок передачи заверенных сообщений	Ошибки недопустимы	Ошибки недопустимы	Допустимо значительное число ошибок	Допустимо ограниченное число ошибок
Требования к пропускной способности канала связи	Увеличиваются	Увеличиваются существенно	Увеличиваются	Не увеличиваются
Выполнение защиты	Автоматическое	Автоматическое	Автоматическое, возможен контроль подлинности человеком	Преимущественно контроль подлинности человеком
Стойкость к имитовводу ложных сообщений	Высокая	Высокая	Высокая	Низкая
Вид заверяемой информации	ПД, телеграфная, речевая, факсимильная, видео	ПД, телеграфная, речевая, факсимильная, видео	Речевая, аудио, факсимильная, видео	Телеграфная, речевая, аудио, факсимильная, видео
Сертифицированные средства	Имеются	Имеются	Отсутствуют	Имеются

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

не допускает искажений в заверенном сообщении, вызванных ошибками канала связи или обработкой сообщения пользователем;

3. Имитозащита изображений на основе стеганографических методов позволяет защитить информацию от несанкционированного копирования; позволяет защитить АМ от удаления из сообщения; допускает некоторые искажения в заверенном сообщении, вызванные ошибками канала связи или обработкой сообщения пользователем;

4. При этом имитозащита изображений на основе стеганографических методов зависит от различных типов мультимедийных сообщений (необходимо применять различные алгоритмы для различных типов мультимедийных сообщений – изображений, видео, речи и т.п.).

Заключение

Проведенные исследования показали, что основным преимуществом стеганографических методов имитозащиты мультимедийных сообщений является помехозащищенность, а основным преимуществом криптографических методов – наличие сертифицированных алгоритмов создания имитовставки, ЭЦП или открытых/закрытых пар ключей шифрования.

Решение задачи повышения имитозащиты и помехозащищенности информации при передаче по каналам связи в условиях преднамеренных помех возможно в случае внедрения аутентификационной метки в спектральную область изображения. При этом система ортогональных сигналов должна быть построена на основе процесса ортогонализации криптографического ключа шифрования, выданного сертифицированным удостоверяющим центром.

Литература

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: 2-е изд. Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. 1104 с.
2. Грибунин В.Г., Оков И.Н., Туринцев И.В. Цифровая стенография (Серия «Аспекты защиты»). М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2009. 265 с.
3. ГОСТ 28147-89. Системы обработки информации. Защита криптографическая. Алгоритм криптографического преобразования.
4. ГОСТ Р 34.10-2012. Информационная технология (ИТ). Криптографическая защита информации. Процессы формирования и проверки электронной цифровой подписи.



ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.056.53

ОСОБЕННОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДОВЕРИЯ В ГЕТЕРОГЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

THE FEATURES OF ENSURING TRUST IN HETEROGENEOUS INFORMATION SYSTEMS

Роман Валериевич Гнедин

аспирант
начальник отдела
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: 8 (926) 249-84-64
E-mail: rgnedin@gmail.com

Вадим Геннадьевич Грибунин

почетный работник науки и техники РФ
доктор технических наук
главный научный сотрудник
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: 8 (4967) 35-31-93
E-mail: v.gribunin@iifmail.ru

Аннотация

В статье рассматривается понятие доверия в информационных системах, показана эволюция этого понятия в нормативных документах. Приведен практический пример реализации доверительного уровня в разработанной информационной системе. Рассматривается модуль TPM, обеспечивающий доверие, его характеристики и перспективы применения.

Ключевые слова: информационная система, доверительный уровень, модуль TPM.

Summary

The article considers the concept of trust in information systems, shows the evolution of this concept in normative documents. A practical example of the implementation of the trusted layer in the developed information system is given. The module TPM providing trust, its characteristics and application prospects are considered.

Keywords: information system, confidence level, module TPM.

О понятии «доверия» и встроенных периметрах защиты

В толковом словаре [1] понятие доверия определяется как «убежденность в честности, добросовестности, искренности кого-либо, чего-либо, в правильности чего-либо и основанное на этом отношении к кому-либо, чему-либо». В лексикон российских специалистов в области защиты информации понятие «доверия» было введено сравнительно недавно. В РД Гостехкомиссии, выпущенных в 1992 году, упоминались некие гарантии проектирования, а уже в 2002 году, в документе, выпущенном в развитие положений ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408, была использована применяемая в мире терминология [2]. Под доверием здесь понимается «основание для уверенности в том, что сущность отвечает своим целям безопасности».

Это основание для уверенности появляется за счет выполнения разработчиком при создании продукта определенных процедур, связанных как с документированием самого продукта, так и его функций безопасности. Доверие повы-

шается также за счет проведения независимой оценки продукта, проводимой у нас в стране обычно в форме сертификации по требованиям безопасности информации.

При создании крупных информационных систем разработчик обычно вынужден использовать самые разнородные компоненты, далеко не все из которых являются доверенными. Это может быть программное обеспечение (ПО) с открытым исходным кодом, проприетарное ПО как отечественного, так и зарубежного производителя. Возникает задача построения доверенной информационной системы на основе частичного использования недоверенных компонентов.

В работе [3] были введены обобщенные критерии доверия ПО:

d1 – авторизация кода (авторы/правообладатели – резиденты РФ, независимое подтверждение авторства и лицензионной чистоты кода);

d2 – представление комплекта конструкторской и эксплуатационной документации в соответствии с ГОСТ ЕСКД (ЕСПД) РФ;

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

d3 – контроль (внешним) уполномоченным органом (ФСТЭК РФ, ФСБ РФ) всех этапов жизненного цикла программных изделий

На основе введенных критериев доверия автором [3] предложена классификация ПО:

- абсолютно доверенное (все критерии выполнены);
- условно доверенное (невыполнение хотя бы одного из критериев);
- недоверенное (невыполнение всех критериев).

Далее в работе [3] предложен механизм встроенных периметров защиты, в пределах которых должны реализовываться наиболее ответственные функции. Эти периметры защиты должны реализовываться только абсолютно доверенными средствами. В распределенной информационной системе взаимодействие между недоверенными компонентами может происходить только при посредничестве и под контролем доверенных средств. Доверенные компоненты располагаются в иерархически расположенных слоях, образующими «дерево», в котором доверие распространяется от корня к листьям. Рассмотрим особенности практической реализации «корневого» слоя, обеспечивающего доверие.

Особенности практической реализации защищенной информационной системы

Нами выполнялась работа по созданию защищенной информационной системы автоматизации учета и обработки электронных версий документов. С учетом требований регулятора был выбран стек доверенного общего программного обеспечения на основе защищенной операционной системы AstraLinux SE (ЗОС Astra) с применением АПМДЗ.

Была выбрана СУБД *PostgreSQL* из состава ЗОС *Astra*, язык *Cu++*, интерпретатор командной строки *bash*. В условиях задачи был поставлен вопрос о выделении в ПО базового (корневого) слоя.

Поскольку для хранения основных информационных объектов было выбрано общее программное обеспечение (ОПО) со встроенным механизмом разграничения дискреционного и мандатного доступа, центром взаимодействия модулей стала база данных (БД). Вся работа в СУБД *PostgreSQL* производится в таблицах, но в базе данных также присутствуют объекты обслуживания: роли, привилегии, хранимые процедуры и функции, хранимые запросы (представления – *view*). Доступ к данным таблиц управляется с помощью ролей и привилегий. Хранимые процедуры и функции, представления предназначены для комплексной предва-

рительной обработки информации при вводе и преобразования в нужный вид ее при выводе. На *рисунке 1* показано взаимодействие функциональных модулей (ФМ) с таблицами БД напрямую и через хранимые процедуры, функции и представления, имеющее хаотичный характер. Все объекты в базах данных организуются в схемы данных (*dataschema*).

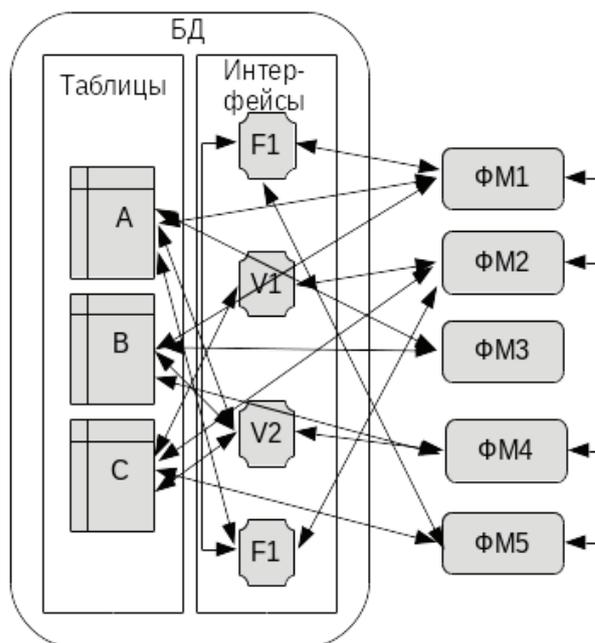


Рис. 1. Взаимодействие ФМ с таблицами БД

Одним из ключевых требований к разрабатываемой системе было обеспечение высокой модульности СПО, которое заключалось в необходимости обеспечить доступ к заданному администратором набору функционала для некоторого оператора вне зависимости от рабочей станции, на которой происходит выполнение. Решено было реализовать это требование с помощью динамически подключаемых модульных библиотек (*plugin*). Такая библиотека может содержать одну или несколько функциональных задач, загружается с сервера с помощью менеджера пакетов и привязывается к функционалу основной программой графического интерфейса пользователя (Мастер-ГИП) уже во время исполнения. Само приложение Мастер-ГИП фактически не содержит функционала и служит средой выполнения для функциональных модулей.

Исходя из приведенных требований (модульность, защищенность) и возможностей защищенной СУБД, автором было предложено архитектурное решение о создании базового программного слоя на основе хранимого функционала базы данных, а именно хранимых про-

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

цедур и функций и представлений. Такой слой обеспечивает обмен данными между функциональными загружаемыми модулями и изоляцию различных функций, исполняющих указания оператора. На *рисунке 2* изображен базовый слой СПО.

В результате использования такого варианта архитектуры СПО загрузочные модули превратились в графические формы представления данных на экране или бумаге, тогда как логическая составляющая полностью была перенесена в хранимые процедуры и функции.

При разработке СПО разработчикам конкретных функциональных задач было задано ограничение, в соответствии с которым каждый обмен информацией или, иными словами, транзакция, выполняется отдельной хранимой функцией на языке PL/SQL, которая проверяет полученные данные. Функция может информацию принять или отклонить. Благодаря этому и транзакционному механизму СУБД *PostgreSQL*, каждая команда оператора или успешно выполняется или полностью отменяется, что защищает состояние БД от неконсистентного состояния. Возможность дополнительных проверок на особые привилегии, например, невыполнимые в БД, позволяет защитить информацию в тех случаях, когда возможностей СУБД недостаточно. Такое применение СУБД не ухудшает, а дополняет встроенные механизмы защиты информации ЗОС *Astra*.

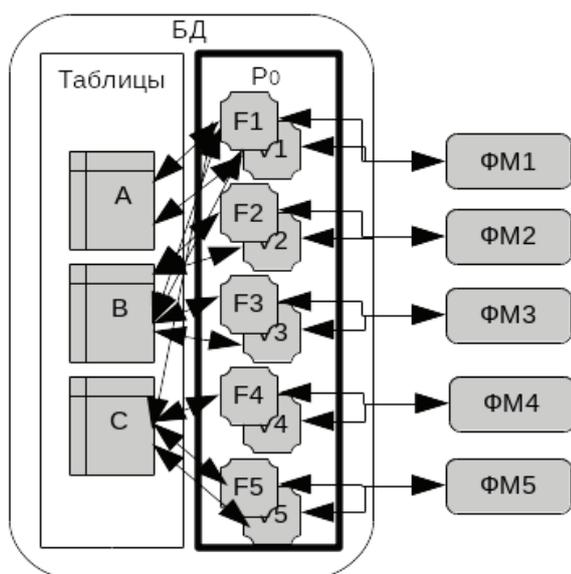


Рис. 2. Выделение корневого слоя P_0

Дополнительно, для эффективного применения приведенного решения дополнительно были проведены следующие работы:

1. Хранимые процедуры, функции, процедуры и представления были вынесены в отдельные логические схемы БД. Это позволило формально выделить базовый корневой слой, а также обеспечить срочное обновление функционала для опытной эксплуатации и технического надзора, позволило выполнять изменение структуры БД изолировано от изменения остальных слоев СПО. Набор этих схем стал программным интерфейсом базового слоя.

2. Путем расчета контрольных сумм схем данных БД, был разработан механизм контроля содержания функционала базового слоя.

3. Был разработан специальный сервер хранения файлов на сервере для хранения файлов и применения его в транзакциях БД.

4. Был разработан сервис сетевой обратной связи из СУБД к Мастер-ГИП для управления административным функционалом и оповещения о событиях оператора.

Решение, основанное на создании базового слоя, несмотря на возросшую трудоемкость, привело к следующим результатам.

1. Позволило выделить базовый слой СПО для большей изоляции функционала с целью изоляции СПО и обеспечения защиты информации в разработанном изделии.

2. Обеспечило возможность параллельной разработки различных функциональных модулей несколькими разработчиками одновременно.

3. Защитить данные от неконсистентного состояния в тех случаях, когда для этого не достаточно возможностей реляционной СУБД.

4. Позволило выполнить требование модульности.

5. Позволило создать решения по административному управлению функционалом СПО и оперативному оповещению оператора.

Возникают вопросы: что является корнем доверия? При помощи каких механизмов должно происходить распространение доверия? Ответ на это вопросы дает криптография и новый класс криптографических средств – модуль доверенной платформы (TRM) (от англ. *TrustedPlatformModule*).

Доверенная аппаратно-программная платформа и криптографические механизмы безопасности

TRM является активным агентом информационной безопасности, придаваемым в помощь центральному процессору (CPU) для решения соответствующих задач безопасности. Активный агент безопасности в настоящее время реализуется, как правило, в виде отдельного микроэлек-

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

тронного чипа, устанавливаемого на материнскую плату ПЭВМ и подключаемого к центральному процессору через «южный мост».

В некоторых современных процессорах, главным образом предназначенных для мобильной платформы, CPU и модуль TPM представляют собой одно целое и реализуются в одном кристалле кремния (например, семейство процессоров Marvell, применяемых в коммутаторах, *MarvellPXA310* и др.). Ряд ведущих производителей в США (*NationalSemiconductor*; *Broadcom*) совмещают реализацию модуля TPM в одном чипе с сетевыми контроллерами, а также с устройствами периферийного ввода/вывода информации.

Модули TPM в программно-аппаратной среде ПЭВМ начинают функционировать с первых тактов работы CPU, до запуска BIOS и выполняют в ходе функционирования следующие задачи:

- контроль целостности и заданной конфигурации платформы, а также состав подключенных к ней периферийных технических средств;
- контроль подлинности платформы, на которую установлен модуль TPM (аутентификация платформы);
- контроль целостности BIOS;
- контроль целостности и заданной конфигурации программной среды, включая операционную систему;
- аутентификацию пользователя (аутентификация может быть однофакторная или многофакторная);
- динамический контроль целостности и санкционированный запуск программ, включая программы операционной системы и приложения пользователя;
- генерация и хранение с защитой от НСД ключей шифрования;
- генерация и хранение с защитой от НСД ключей ЭЦП;
- вычисление и верификация ЭЦП под массивами информации, данных, под подпрограммами и электронными документами;
- хранение с защитой от НСД критических данных о платформе и о ее программной среде, а также ряд других функций.

Технологии доверенных вычислений в настоящее время активно развиваются. Уже сейчас спецификации международной организации *TrustedComputingGroup* (TCG) распространяются

на компьютеры и серверы; маршрутизаторы и устройства ввода/вывода; на электронные смарт-карты и на устройства памяти (жесткие диски); средства мобильной связи и на коммутаторы, офисные периферийные технические средства и ряд других.

Однако в основе технологий доверенных вычислений, согласно действующих международных спецификаций, положены зарубежные методы и алгоритмы криптографической защиты. В микроэлектронных чипах TPM предусматривается многоуровневая защита от НСД, реализуемая технологическими (на уровне нанометровых технологий) и криптографическими методами. Ни одна фирма-производитель не предоставляет потребителю (пользователю) информацию или документацию в полном объеме о происходящих в модуле TPM процессах, тем более об их топологии.

В силу указанных причин технологии доверенных вычислений в России до недавнего времени не развивались, а экспорт в Россию несертифицированных средств криптографической защиты информации на базе TPM модулей запрещен.

В настоящее время в деятельности международного консорциума TCG из российских фирм участвует только АО «ПНИЭИ», г. Пенза [4].

Учитывая профиль данной компании, представляется возможным надеяться на разработку отечественного чипа TPM, который станет корнем доверия в отечественных защищенных информационных системах.

Литература

1. Ефремова Т.Ф. Современный словарь русского языка три в одном: орфографический, словообразовательный, морфемный: около 20000 слов, около 1200 словообразовательных единиц. М.: АСТ, 2010. 699 с.
2. Руководящий документ. Безопасность информационных технологий. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Гостехкомиссия, 2002. 56 с.
3. Здирук К.Б. Применение технологии встраиваемых периметров защиты в критически важных информационно-управляющих системах. / Международный электроэнергетический форум RUGRIDS-ELECTRO 2015.
4. <http://trustedcomputinggroup.org/membership/member-companies/>

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.056.55

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ
ВОЗМОЖНОСТЕЙ НАРУШИТЕЛЯ
БЕЗОПАСНОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ
СИСТЕМ ПУТЕМ ВКЛЮЧЕНИЯ В
ТОПОЛОГИЮ СЕТИ ЛОЖНЫХ СЕТЕВЫХ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ**

**DETERMINATION OF THE MAIN
OPPORTUNITIES OF THE INFORMATION
SYSTEMS SECURITY INFRINGER BY
CONNECTION IN THE TOPOLOGY OF
THE NETWORK OF FALSE NETWORK
INFORMATION OBJECTS**

Павел Евгеньевич Стародубцев

начальник управления аппаратно-
программных комплексов
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: 8 (4967) 35-31-93
E-mail: starodoubtsev@inbox.ru

Евгений Олегович Бухаров

кандидат технических наук
заместитель начальника научно-
исследовательского отдела
Краснодарское высшее военное училище
имени генерала армии С.М. Штеменко
Адрес: 350063, г. Краснодар,
ул.Красина, д. 4
Тел.: +7 (909) 456-62-09
E-mail: coster@list.ru

Роман Андреевич Кудря

курсант
Краснодарское высшее военное училище
имени генерала армии С.М. Штеменко
Адрес: 350063, г. Краснодар, ул.Красина, д. 4
Тел.: +7 (938) 519-25-53
E-mail: rm.kdr@yandex.ru

Ярослав Дмитриевич Смирнов

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

Аннотация

В статье предлагается использовать теоретико-игровой подход для моделирования взаимодействия между защитником и нарушителем путем развертывания ложных сетевых информационных объектов в качестве средства для привлечения основного внимания нарушителя и получения информации о его реальных намерениях.

Ключевые слова: теоретико-игровой подход, ложный сетевой информационный объект, компьютерная атака, инцидент информационной безопасности

Summary:

The article proposes using the game-theoretic approach to simulate the interaction between the defender and the intruder by deploying false network information objects as a means to attract the intruder's main attention and obtain information about its real intentions.

Keywords: game-theoretic approach, false network information object, computer attack, information security incident.

Типовая структура информационно-телекоммуникационных сетей и телекоммуникационного оборудования любой организации предполагает, как минимум, наличие пограничного маршрутизатора, межсетевого экрана (криптомаршрутизатора), а также коммутатора, к которому подключаются автоматизированные рабочие места исполнителей, администраторов безопасности, серверы, а также информационные системы, необходимые для выполнения органи-

зацией задач по предназначению (рисунк 1).

Одним из методов обнаружения и предупреждения компьютерных атак на инфраструктуру организации является применение в сети ложных сетевых информационных объектов (рисунк 2).

Основная задача ложного сетевого информационного объекта (АСИО) – реализация функций сокрытия защищаемых информационных систем и их ресурсов, а также дезинформиро-

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

вание потенциального нарушителя. Кроме того ЛСИО позволяют в реальном масштабе времени выявлять совершаемые атаки, направлять их на ложные объекты, исследовать действия нарушителя и определять его намерения, а также выявлять неизвестные ранее уязвимости системы, т.е., другими словами, позволяют отслеживать возникающие события информационной безопасности, а также предотвращать инциденты информационной безопасности.

Любой возникающий инцидент можно рассматривать как конфликтную ситуацию.

Исход конфликтной ситуации при возникновении инцидента – есть функция выборов способов действий всех сторон, принимающих участие в этой ситуации. Для анализа конфликтной ситуации не представляется возможным использовать методы классической математики и математического программирования, а требуется применение специальной теории. Такой теорией, понимаемой как раздел исследования операций, является теория игр [1]. Предметом исследования теории игр являются принципы рационального поведения участников игры.

Методология исследования эффективности и обоснования решений на основе количественных оценок требует математизации ситуации принятия решения – построения модели проблемной ситуации. Общая модель проблемной ситуации применительно к количественному

анализу конфликтных ситуаций приобретает форму игры. Таким образом, игра – математическая модель конфликтной ситуации [2].

Ложные сетевые информационные объекты, конфигурирование которых основано на применении теории игр, могут стать новым основным подходом к нейтрализации различных компьютерных атак, таких как DoS-атаки, сканирование сети и др.

Основная проблема оптимизации конфигурирования ЛСИО со стороны защитника, заключается в распределении ресурсов таким образом, чтобы затраты были минимальными, а время сдерживания нарушителя принимало максимальные значения.

В статье предлагается использовать теоретико-игровой подход для моделирования взаимодействия между защитником и нарушителем путем развертывания ЛСИО в качестве средства для привлечения основного внимания нарушителя и получения информации о его реальных намерениях.

Теория игр использовалась в области кибербезопасности, начиная от беспроводных сенсорных сетей, используемых для осуществления DoS-атак, которые в последствие переросли в основную уязвимость при ведении информационных войн [4]. Интеллектуальный нарушитель высокого уровня может запускать простые сценарии, чтобы понять истинную сущность системы (реальная она или ложный объект). Например, нарушитель может измерять задержки во времени ввода-вывода или изучать необычные и случайные системные вызовы на сервере защитника.

В игре системно решается тип защитника: либо реальная система (N), либо ЛСИО (H). Основываясь на типе, защитник делает либо правдивое раскрытие, либо отправляет сигнал обмана. Например, когда защитник посылает сигнал « H » (кавычки указывают, что сообщение является сигналом) для типа N , он раскрывает истинную сущность реальной системы.

Получатель (нарушитель) принимает сигнал « H » или « N » и решает о дальнейшем действии: атака (A), наблюдение (O) или отступление (R). Оба игрока выберут вариант, который даст им максимальную выгоду, учитывая все возможные варианты.

Введем следующие обозначения [5]:

A – атакующий (принимающий сигналы);

D – защитник (отправитель сигнала);

Θ_d – вероятность правильности решения, принятого нарушителем о типе защиты;

α^N – вероятности отправки сигнала « N » реальной системой;



Рис. 1. Типовая структура телекоммуникационной сети организации



Рис. 2. Типовая структура организации с применением ложных сетевых информационных объектов

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

α^H – вероятность отправки сигнала «N» ЛСИО;
 μ – относится к убеждению нарушителя и является относительной вероятностью получения сигнала «N» от реальной системы. Соответственно, $(1-\mu)$ – вероятность, когда сигнал «N» принадлежит ЛСИО;

γ – означает убеждение нарушителя в том, насколько вероятен сигнал «H», возникающий от реальной системы, а $(1-\gamma)$ – от ЛСИО;

c_a и c_o – затраты нарушителя на атаку и наблюдение соответственно, где $c_a, c_o \geq 0$ (нарушитель не несет никаких потерь при отступлении);

b_a и b_o – соответствуют выгоде атаки и наблюдения соответственно, где $b_a \geq c_a, b_o \geq c_o$;

c_s, c_h, c_w, c_w – затраты защитника на компромисс, сигнализацию, атаку ЛСИО и наблюдение, соответственно, где $c_s, c_h, c_w, c_w \geq 0$;

b_{cs} и b_w – удовлетворенность клиентов системы при ее функционировании и преимущество атакующего, полученное в связи с наблюдением за ЛСИО, соответственно;

R_d – это уровень обслуживания защитника;

R_a – уровень атаки нарушителя.

Таблица 1

Действия и заданные вероятности

$\alpha^N = Pr('N' typeN)$	$(1-\alpha^N) = Pr('H' typeN)$
$\alpha^H = Pr('N' typeH)$	$(1-\alpha^H) = Pr('H' typeH)$
$\mu = Pr(typeN 'N')$	$(1-\mu) = Pr(typeH 'N')$
$\gamma = Pr(typeN 'H')$	$(1-\gamma) = Pr(typeH 'H')$

Рисунок 3 иллюстрирует последовательность ложных действий в игре. Среда взаимодействия определяет тип системы как реальной (N) с вероятностью Θ_D (верхняя часть фигуры) или ЛСИО (H) с вероятностью $1-\Theta_D$ (нижняя заштрихованная часть фигуры), и это известно только защитнику. Защитник может выбрать вариант раскрытия своей реальной системы, отправив сообщение N (верхняя левая ветвь) или H (нижняя правая ветвь). С другой стороны, он может обмануть атакующего сигналом «H» от реальной системы (верхняя правая ветвь) или «N» от ЛСИО (нижняя ветвь).

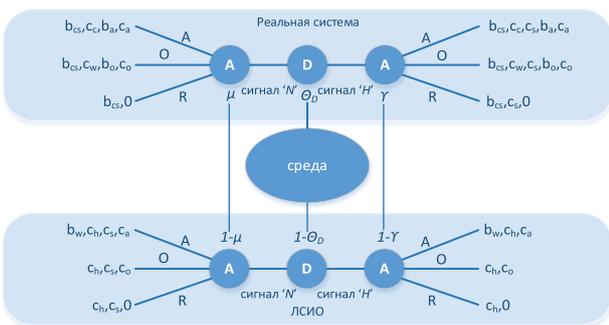


Рис. 3. Сигнальная игра

Нарушитель получает сигнал «N» или «H» от защитника, обновляет вероятность μ и γ , после чего принимает соответствующее решение.

Необходимо обратить внимание на случаи высокого и низкого уровней безопасности, отраженных на рисунках 4 и 5 соответственно. Уровень защиты определяется сложностью загадки, которую атакующий пытается решить путем перехвата сообщений. Например, затраты на анализ сообщений нарушителем на высоком уровне безопасности (например, для 100 сообщений) могут заключаться в разности между затратами нарушителя на компромисс (C_c) и стоимостью атаки (C_a), например, $C_c=4000$ единиц, в то время как $C_a=600$ единиц.

Используются эти значения для оценки скорости обслуживания со стороны защитника, чтобы в результате появилась возможность оценить «разрушающую» возможность стратегии атакующего. Формула (1) используется для оценки коэффициента удовлетворенности клиентов (R) в отношении эффективности обслуживания системы [6].

$$U(R) = 0.16 + 0.8lh(R-3) \quad (1)$$

Формула (1) определяет степень удовлетворенности клиентов, которые посещают необходимые им ресурсы системы, когда данные ресурсы работают со скоростью обслуживания R . Соответственно, скорость обслуживания R может быть нарушена атакой на сервер.

Получив новые значения, такие как исход-

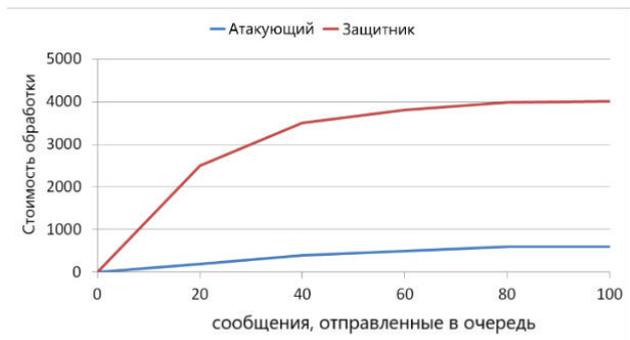


Рис. 4. Высокий уровень защиты

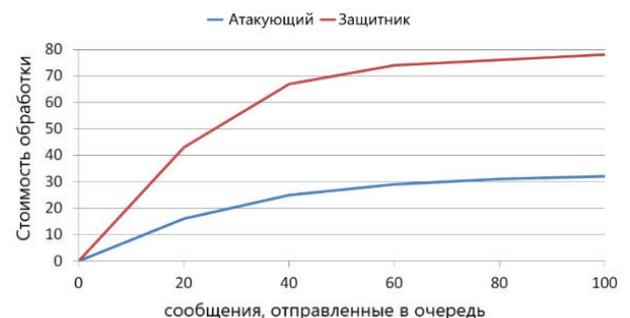


Рис. 5. Низкий уровень защиты

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ная скорость обслуживания, которая обозначена как $V_1 R_d$, а также скорость обслуживания после атак нарушителя $V_2 R_d$, получаемую при отправке небольшого количества трафика со стороны нарушителя (в случае отправки реальной системой сигнала «Н») необходимо обновить форму игры (рисунк 6).

Таблица 2
Распределение R_d, R_a в зависимости от посылаемых сигналов

$(s_1, s_2)^*, (a_1, a_2)$	Условия	μ, γ
('N', 'H') – (A, R)	$R_d \geq \frac{c_c - c_s}{v_1 - v_2}, R_d \geq \frac{b_0 - c_s}{v_3 - v_4}, R_a \leq \frac{c_c}{v_a}$	1, 0
('N', 'H') – (R, R)	$R_d \leq \frac{c_s}{V_2 - V_1}, R_d \leq \frac{c_s}{v_4 - v_3}, R_a > \frac{c_c}{V_a}$	1, 0
('H', 'N') – (A, R)	$R_d > \frac{c_c + c_s}{V_2 - V_1}, R_d \leq \frac{b_0 + c_s}{v_4 - v_3}, R_a \leq \frac{c_c}{V_a}$	0, 1
('H', 'N') – (R, R)	$R_d > \frac{c_s}{V_2 - V_1}, R_d > \frac{c_s}{v_4 - v_3}, R_a > \frac{c_c}{V_a}$	0, 1

* s_1, s_2 представляют собой сигналы, посылаемые реальной системой и ЛСИО защитника соответственно (a_1, a_2 представляет ответы ата-

кующего против реальной системы и ЛСИО соответственно).

Результаты на *рисунке* показывают, что действия сторон могут быть описаны различными случаями:

1. Случай, когда уровень защиты очень высок по сравнению с уровнем атаки (данное взаимодействие отражается квадратом \square и треугольником ∇). Защитник не нуждается в использовании ЛСИО, потому что расходы, вызванные сигнализацией и обнаружением, больше, чем ущерб, который способен нанести нарушитель.

Необходимо уточнить данный вариант. С одной стороны, когда ресурсы нарушителя и количество посылаемого им трафика атакующего сопоставимы с возможностями защитника (треугольник ∇ описывает данное взаимодействие), нарушитель хочет атаковать реальную систему, а затем убедиться в наличии ЛСИО и при возможности исследовать [6].

С другой стороны, если уровень обслуживания защитника чрезвычайно высок (действия описаны квадратом \square на *рисунке* 7), то нарушитель с полной уверенностью решает отступить. То есть, атакующий учитывает предыдущее мнение (Θ_D), сигнал (s) и заданную вероятность (μ), тем самым атака становится нерациональной.

Однако, в первом случае (описанном треугольником ∇), так как уровень атаки относительно близок к уровню защиты, атакующий приобретает необходимую мотивацию и возможности для атаки в случае, получения сигнала «N». Другими словами, потенциальный урон, который он может причинить (если цель является реальным объектом) больше, чем затраты, которые понесет сторона защиты при использовании ЛСИО.

2. При объединении равновесий, где защитник, используя разные типы систем, выбира-

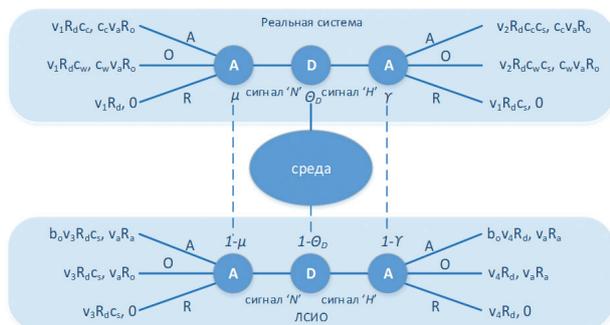


Рис. 6. Сигнальная игра в обновленной форме

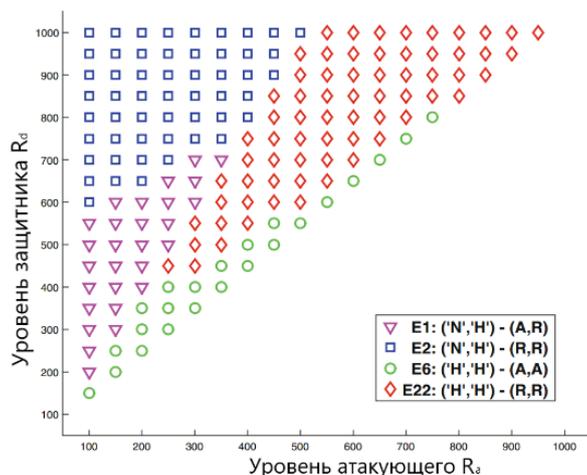
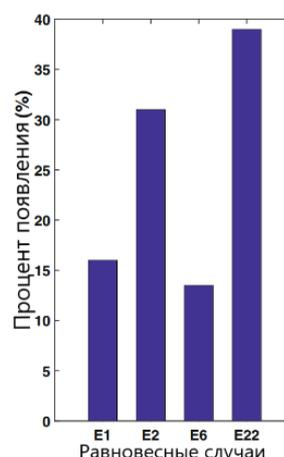


Рис. 7. Вероятные действия сторон



ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ет одинаковые сигналы для отправки (действия описываются ромбом \diamond и кругом \circ) видно, что если скорость атакующего (количество трафика) очень близка к скорости обслуживания защитника, атакующий с полной уверенностью выбирает путь атаки (взаимодействие отражено кругом \circ). Если атака удалась, ущерб защитнику огромен, то есть на стороне сервера может возникнуть постоянная недоступность.

Однако, в некоторых случаях, даже если количество посылаемого нарушителем трафика достаточно большое, он может предпочесть отступить из-за вероятности того, что защитник использует ЛСИО (ромб \diamond отражает данное действие).

На рисунке 8 отражены действия сторон при различных значениях θ_D (уверенность нарушителя относительно типа применяемой защитником системы). В реальных жизненных ситуациях, при правильной конфигурации ЛСИО $0,08 < \theta_D < 0,44$.

Процесс формирования оптимальной конфигурации ЛСИО может быть представлен следующим образом (рисунком 9).

Появление сетевой активности нехарактерной для защищаемой системы может быть явным признаком действий нарушителя. Примерами такой активности может служить сканирование сети с целью выявления открытых портов, осуществление *wget*-запросов (в т.ч. методом *POST*), *curl*-запросов, передача каких-либо не зарегистрированных в системе идентификационных данных и т.п.

После принятия решения на развертывание ЛСИО осуществляется формирование его первоначальной конфигурации и запуск.

На следующем этапе осуществляется выяв-

ление ошибок в функционировании ЛСИО, например: ошибок при открытии портов и развертывании на них ЛСИО, включении ЛСИО в общую топологию и т.п. Параллельно осуществляется логирование пользовательских действий (в том числе действий нарушителя), например: идентификационных данных, передаваемых на эмулированный сервер, поступающих запросов, в том числе недопустимых, логирование и обработка ошибок идентификации и т.п.

Далее осуществляется анализ всех произошедших ошибок, формирование оптимальной конфигурации и перенастройка ЛСИО, после чего процедуры повторяются повторно.

Примеры осуществления логирования ЛСИО основных действий нарушителя представлены ниже. С этой целью разработана программа для операционной системы *Linux* на языке программирования *Python*.

На рисунках 10-12 изображены процесс запуска и работы программы, эмулирующей работу HTTP-сервера, тем самым открывая порт, на котором он функционирует (80 порт), разрешая подключение к нему легитимных пользователей.

На рисунках 13-15 отражены основные запросы, которые способен сформировать нарушитель для подключения или изучения сервиса.

На рисунках 16-17 представлен непосредственный функционал разработанной программы по логированию всех подключений к эмулируемому серверу, а также всех вводимых идентификационных данных нарушителем при подключении.

Таким образом, предлагается методология защиты информационных систем путем актив-

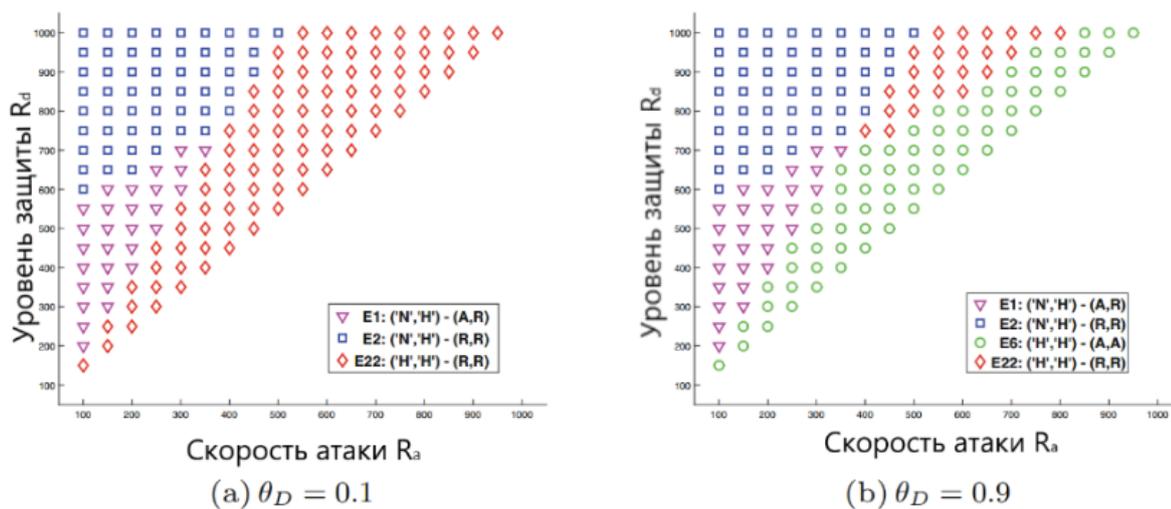


Рис. 8. Вероятные действия сторон с различными значениями θ_D

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ



Рис. 9. Формирование оптимальной конфигурации ЛСИО

ного использования ЛСИО в качестве средства для оказания помощи в разработке эффективных мер реагирования на компьютерные атаки. Кроме того, данная методология может быть обобщена для использования посредством применения теории игр, с целью формулировки и моделирования любых видов атак.

Методы количественной оценки затрат на организацию необходимой защиты могут быть использованы для защиты важнейших корпо-

ративных систем, таких как центры обработки данных, сервера баз данных, а также военных отказоустойчивых, критически важных систем от потенциального противника.

Составление, настройка и использование расширенной сетевой конфигурации, основанной на изучении общих сценариев компьютерных атак, является главной целью данного метода, основанного на теории игр.

```

File Edit View Search Terminal Help
root@kali:~# python LSIO.py
  
```

Рис. 10. Запуск эмуляции сервера

```

:~# wget --post-data='login=Roman&password=gAbfv7824Fa' "http://192.168.182.128"
--2018-12-26 08:31:35-- http://192.168.182.128/
Connecting to 192.168.182.128:80... connected.
HTTP request sent, awaiting response... 501 Unsupported method ('POST')
2018-12-26 08:31:35 ERROR 501: Unsupported method ('POST').
:~#
  
```

Рис. 15. Отправка *wget*-запроса методом POST

```

File Edit View Search Terminal Help
root@kali:~# nmap localhost
Starting Nmap 7.70 ( https://nmap.org ) at 2018-10-04 07:16 EDT
Nmap scan report for localhost (127.0.0.1)
Host is up (0.0000060s latency).
Other addresses for localhost (not scanned): ::1
All 1000 scanned ports on localhost (127.0.0.1) are closed
Nmap done: 1 IP address (1 host up) scanned in 0.19 seconds
  
```

Рис. 11. Проверка работоспособности

```

File Edit View Search Terminal Help
:~# sudo netstat -tulpn
Active Internet connections (only servers)
Proto Recv-Q Send-Q Local Address           Foreign Address         State       PID/Program name
tcp        0      0 0.0.0.0:80              0.0.0.0:*               LISTEN     1065/python
tcp6       0      0 ::::80                  ::::80                   LISTEN     1065/python
  
```

Рис. 12. Определение сервисов, работающих на данном хосте, 80 порт принадлежит ложному объекту

```

:~# curl -u Admin:ndDS34sF21K "http://192.168.182.128"
:~#
  
```

Рис. 13. Отправка *curl*-запроса на эмулируемый сервер

```

:~# wget --user=Admin --password=padsg#1lass "http://192.168.182.128"
--2018-12-26 08:33:54-- http://192.168.182.128/
Connecting to 192.168.182.128:80... connected.
HTTP request sent, awaiting response... 401 Unauthorized
Authentication selected: Basic name configure="Administrator"
Connecting to 192.168.182.128:80... connected.
HTTP request sent, awaiting response... 401 Unauthorized
Username/Password Authentication Failed.
:~#
  
```

Рис. 14. Отправка стандартного *get*-запроса

```

GNU nano 3.1 access.log file
(Wed Dec 26 08:31:35 2018 - дата и время события)
{192.168.182.128:60498} - IP-адрес отправителя запроса
Тип запроса - "{POST / HTTP/1.1}"
Ответ сервера - 501

(Wed Dec 26 08:32:13 2018 - дата и время события)
{192.168.182.128:60500} - IP-адрес отправителя запроса
Тип запроса - "{GET / HTTP/1.1}"
Ответ сервера - 401

(Wed Dec 26 08:33:14 2018 - дата и время события)
{192.168.182.128:60502} - IP-адрес отправителя запроса
Тип запроса - "{POST / HTTP/1.1}"
Ответ сервера - 501

(Wed Dec 26 08:33:54 2018 - дата и время события)
{192.168.182.128:60504} - IP-адрес отправителя запроса
Тип запроса - "{GET / HTTP/1.1}"
Ответ сервера - 401

(Wed Dec 26 08:33:54 2018 - дата и время события)
{192.168.182.128:60506} - IP-адрес отправителя запроса
Тип запроса - "{GET / HTTP/1.1}"
Ответ сервера - 401
  
```

Рис. 16. Логирование принятых запросов

```

GNU nano 3.1 service_simulation.log file
Service_simulation will be start with paramtrs 192.168.182.128 - IP-address and 80 - port
192.168.182.128 - [26/Dec/2018 08:31:35] code 501, message Unsupported method ('POST')
(Wed Dec 26 08:32:13 2018 - дата и время события)
{192.168.182.128:60500} - IP-адрес отправителя
Переданные идентификационные данные - Admin:ndDS34sF21K
192.168.182.128 - [26/Dec/2018 08:33:14] code 501, message Unsupported method ('POST')
(Wed Dec 26 08:33:54 2018 - дата и время события)
{192.168.182.128:60506} - IP-адрес отправителя
Переданные идентификационные данные - Admin:padsg#1lass
service_simulation will be stoped
  
```

Рис. 17. Логирование введенных идентификационных данных

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Литература

1. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология: учебное пособие, 5-е изд. М.: КНОРУС, 2013. 192 с.
2. Бухаров Е.О., Соколовский С.П., Калач А.В., Зенин А.А. Поддержка принятия управленческих решений в сфере информационной безопасности в терминах теории игр. Сборник материалов Международной научно-практической конференции. Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2018. С.262-264.
3. Стародубцев П.Е., Смирнов Д.В. Построение многоуровневой защиты корпоративных информационных систем с применением обманных технологий // Известия Института инженерной физики, 2017. № 1 (43). С. 68-71.
4. Хейтценратер Ч., Тейлор Д.И. Когда победный ход не должен существовать: игры сдерживания в кибербезопасности // Springer, Heidelberg, 2015. С.250-269.
5. Rowe, N.C., Custy, E.J., Duong, B.T. Defending cyberspace with fake honeypots. J. Comput. 2(2), 25–36 (2007).
6. Rass S., Rainer B. Numerical computation of multi-goal security strategies. In: Poovendran, R., Saad, W. (eds.) Decision and Game Theory for Security, pp. 118-133. Springer, Heidelberg (2014).

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 629.73.07

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ИСПЫТАНИЙ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ВОЕННОГО И СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

ENSURING THE SAFETY OF TESTING UNMANNED AERIAL VEHICLES FOR MILITARY AND SPECIAL PURPOSES

Евгений Александрович Антохин

начальник научно-исследовательского
испытательного отдела
ФГБУ «Главный научно-исследовательский
испытательный центр робототехники» МО РФ
(ФГБУ «ГНИИЦ РТ» МО РФ)
Адрес: 125167, Москва, ул. Серёгина, д. 5
Тел.: +7 (495) 779-35-80

Николай Николаевич Панасенко

кандидат технических наук
научный сотрудник отдела
ФГБУ «ГНИИЦ РТ» МО РФ

Олег Игоревич Атакищев

доктор технических наук, профессор
заместитель генерального директора
по специальным проектам
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7 (4967) 35-31-93
старший научный сотрудник отдела
ФГБУ «ГНИИЦ РТ» МО РФ
E-mail: aoi007@mail.ru

Пламена Дмитриевна Чернова

научный сотрудник отдела
ФГБУ «ГНИИЦ РТ» МО РФ

Аннотация

В статье проведен анализ возможных критических отказов и их последствий, возникающих в ходе проведения испытаний беспилотных летательных аппаратов военного и специального назначения. На основе полученных результатов предложен комплекс организационно-технических мер по обеспечению безопасности их полигонных испытаний.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты военного и специального назначения, организационно-технические меры по обеспечению безопасности испытаний, критические отказы, авиационные происшествия, опасные ситуации в ходе проведения испытаний.

Summary

The article provides an analytical review of possible critical failures and their effects taking place during testing of unmanned aerial vehicles for military and special purposes. A list of possible measures for ensuring safe testing is proposed as a result of the analysis.

Keywords: unmanned aerial vehicles for military and special purposes; measures for safety of testing; critical failures; flight incidents; dangerous situations during testing.

Введение

В настоящее время в России и за рубежом разработка и внедрение технологий беспилотной авиации является магистральным направлением совершенствования и качественного обновления общевойсковых тактических формирований, форм и способов решения широкого спектра боевых и обеспечивающих задач [1].

По этой причине проектирование, создание и внедрение в войска беспилотных летательных аппаратов (БЛА) уже сегодня требует разработки принципиально новых методических подходов к проведению их испытаний и исследований.

При этом следует отметить, что опытные образцы БЛА являются источниками повышенной опасности для окружающей среды, личного со-

става, объектов инфраструктуры полигонов, и всестороннее обеспечение безопасности проводимых работ является важнейшей задачей руководителя испытаний.

Наибольшую опасность в ходе проведения испытаний представляют ударные БЛА, несущие на своем борту авиационные средства поражения, а также БЛА среднего и тяжелого класса, способные развивать высокие скорости полета и обладающие значительной массой.

Критические отказы и их возможные последствия, возникающие в ходе проведения испытаний БЛА

При самом общем подходе связь между источниками критических отказов и возникнове-

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

нием опасных ситуаций в ходе проведения испытаний БЛА могут быть представлены схемой (рисунк 1).



Рис. 1. Связь между источниками критических отказов и возникновением опасных ситуаций в ходе проведения испытаний БЛА

1. Влияние внешней среды на возникновение критических отказов в ходе проведения испытаний БЛА

К группе наиболее неблагоприятных воздействий внешней среды, способных вызывать критические отказы в ходе испытаний, могут быть отнесены:

- отрицательные температуры, вызывающие обледенение корпуса БЛА;
- интенсивные осадки в виде дождя, снега и града, туман и грозы;
- сильная атмосферная турбулентность;
- сдвиг ветра;
- восходящие и нисходящие воздушные потоки;
- присутствие в воздухе посторонних предметов (метеозондов, птиц и т.п.), а также наличие в зонах полета высотных построек (зданий, мачт, линий электропередач, наблюдательных вышек), столкновения с которыми способны вызвать местные повреждения элементов конструкции БЛА.

В случае проведения испытательных работ во время тумана, дождя, снега при температуре на рабочей высоте ниже $+4^{\circ}\text{C}$ возможно обледенение корпуса БЛА. Наиболее подвержены обледенению лопасти винта, передняя кромка крыла, выступающие элементы полезной на-

грузки, а также элевоны, управляющие БЛА во время полета (рисунк 2).

Наледь, образуемая на корпусе, ведет к увеличению массы и разбалансировке аппарата, что приводит к постепенной потере воздушной скорости и высоты, вплоть до полной утраты контроля над БЛА. Для снижения вероятности обледенения возможна обработка наружной поверхности аппарата водоотталкивающей жидкостью, однако опыт показывает, что в силу особых условий полета БЛА данная мера эффективна лишь в 50% случаев [2].

При попадании БЛА в зону ливневого дождя или обильного снегопада также возможен его резкий провал по высоте полета. Кроме того, наличие интенсивных осадков, особенно в виде града, может стать причиной засорения трубки приемника воздушного давления. Данное явление возникает достаточно редко, однако оно способно крайне негативно воздействовать на испытательный полет БЛА.

Результаты анализа авиационных происшествий с участием БЛА показали, что наибольшее количество случаев, связанных с грозовыми разрядами, происходит весной (март, апрель, май). Некоторые удары молний случались при полете БЛА сквозь снегопад, что объясняется сильной наэлектризованностью атмосферы в условиях метелей.

По заявлению специалистов испытательных полигонов, фактическая частота удара молнии в БЛА при пролете в активных грозовых облаках составляет в среднем один случай на сто полетов.



Рис. 2. Обледенение корпуса БЛА

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Не менее опасным явлением для полетов БЛА, особенно при снижении и посадке, является сдвиг ветра. Важным при этом остается значение абсолютной скорости ветра в условиях сдвига, причем оказываемое влияние на БЛА легко класса заметно больше, чем тяжелого [3].

Одним из значимых факторов, влияющих на безопасность полетов БЛА, является также турбулентность атмосферы, возникающая в горных районах и в условиях неустойчивой метеорологической обстановки в осенне-зимний период. Попадание БЛА в зону турбулентности атмосферы способно вызывать:

- потерю устойчивости БЛА из-за превышения допустимых углов атаки, особенно при малых скоростях полета и больших высотах;
- разрушение конструкции БЛА из-за превышения допустимой нормальной и поперечной перегрузки, особенно при больших скоростях полета и малых высотах;
- опасные отклонения БЛА от заданной высоты полета (резкое неконтролируемое снижение).

Опасность для испытательных полетов БЛА представляют также интенсивные восходящие и нисходящие потоки воздуха (со скоростью от 10 м/с), способные вызывать «броски» беспилотников по высоте полета.

2. Влияние неисправностей компонентов БЛА на возникновение критических отказов в ходе проведения их испытаний

Неисправности компонентов БЛА, возникающие в ходе проведения испытаний, способны привести к частичной либо полной потере управляемости беспилотника. Наиболее опасны при испытаниях БЛА неисправности компонентов маршевого двигателя и бортовой системы управления, способные приводить к неконтролируемому падению беспилотного авиационного средства на землю с частичным или полным разрушением.

Отказы компонентов бортовой системы управления БЛА (вычислителя, доплеровского измерителя скорости и угла сноса, радиовысотомера малых высот, датчиков автопилота) могут стать причиной нарушения временного прохождения промежуточных пунктов маршрута, вызвать отклонения от заданной высоты полета и т.п.

3. Влияние несовершенства алгоритмов управления опытными образцами БЛА на возникновение критических отказов в ходе проведения их испытаний

Несовершенство и ошибки алгоритмов

управления опытными образцами БЛА, выявляемые в ходе испытаний, также способны привести к возникновению аварийных ситуаций. Наиболее опасные из них связаны с нарушением основных летных ограничений для БЛА:

- по углу атаки или коэффициенту подъемной силы;
- по минимальному скоростному напору;
- по максимальной скорости [4].

Следствием нарушения указанных ограничений, связанных с летной эксплуатацией опытного образца БЛА, может быть авиационное происшествие, в результате которого произойдет его разрушение в воздухе или неконтролируемое падение на землю.

4. Влияние сбоев программного обеспечения на возникновение критических отказов БЛА в ходе проведения их испытаний

Сбои программного обеспечения опытных образцов БЛА способны оказать значимое влияние на безопасность проведения испытаний и стать причиной авиационных происшествий. Наиболее важные из них связаны с неполным учетом факторов, влияющих на величину дальности полета и безопасность маневров в вертикальной плоскости.

Следствием некорректного учета случайных факторов, влияющих на практическую дальность полета, может быть неправильное определение величины гарантийного технического запаса топлива при проведении расчета дальности полета (РДП) [4]. Указанная ошибка способна привести к неконтролируемому падению БЛА на землю по израсходованию всего располагаемого запаса топлива. К случайным факторам, вызывающим возможное отклонение (увеличение) фактических характеристик расхода топлива БЛА от принятых при РДП, можно отнести:

- отклонение аэродинамических характеристик БЛА в процессе изготовления и эксплуатации корпуса БЛА от характеристик, принятых по результатам испытаний в аэродинамических трубах и уточненных на этапе летных испытаний;
- отличие значений балансирующего отклонения элевонов от значений, полученных при летных испытаниях;
- отклонение фактической величины тяги маршевого двигателя в процессе его изготовления и эксплуатации от величины, принятой по результатам стендовых испытаний маршевого двигателя;
- отличие расходных характеристик маршевого двигателя от характеристик, полученных при летных испытаниях БЛА;

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

- отличие фактического распределения температуры воздуха от принятого при расчетах дальности и продолжительности полета;

- отличие фактического распределения атмосферного давления по высоте от принятого при расчетах дальности и продолжительности полета;

- отличие фактических значений скорости и направления ветра по маршруту полета от прогнозируемых;

- навигационные погрешности;

- погрешность стабилизации заданного высотного-скоростного режима полета и др.

Сбой программного обеспечения, в ходе которого возможен некорректный учет факторов, влияющих на безопасность маневров в вертикальной плоскости при огибании БЛА рельефа местности или искусственных сооружений, способен также стать причиной авиационного происшествия. Минимально допустимая безопасная высота полета, рассчитываемая при проведении инженерно-штурманского расчета, является важнейшим эксплуатационным фактором, определяющим безопасность полетов с огибанием рельефа местности. Она зависит от показателей эксплуатационной маневренности летательного аппарата, определяющих характер изменения кривизны траектории полета БЛА в плоскости симметрии летательного аппарата, в частности:

- от предельно возможных и допустимых величин перегрузок;

- от скорости создания перегрузок;

- от диапазона допустимых скоростей полета.

Следствием некорректного учета факторов, влияющих на рациональное определение минимально допустимой безопасной высоты испытательного полета, может быть авиационное происшествие, заключающееся в столкновении БЛА с рельефом местности или искусственными сооружениями полигона.

5. Влияние радиоэлектронного противодействия на возникновение критических отказов БЛА в ходе проведения их испытаний

При организации испытаний БЛА следует особо помнить, что современные технические средства радиоэлектронной борьбы позволяют не только обнаруживать и пеленговать каналы управления и передачи информации беспилотных авиационных средств, но и вмешиваться в работу бортового радиоэлектронного оборудования (БРЭО) и наземных станций комплексов управления. Эти аспекты требуют разработки специальных организационных и технических мер по обеспечению информационной безопас-

ности испытаний. В данном контексте под информационной безопасностью испытаний БЛА будем понимать совокупность условий, при которых все составляющие информационно-управляющей среды и процессы, протекающие в ней, защищены от максимально возможного числа угроз и воздействий с нежелательными последствиями.

Существующие на сегодняшний день технические средства по противодействию БЛА позволяют сформулировать основные возможности нарушителя по деструктивному воздействию на БРЭО беспилотных авиационных средств [5-14]:

- негативное влияние на электрические параметры сигнала в шине передачи данных;

- перехват управления;

- отправка деструктивных пакетов (данных неправильного формата, которые могут привести к сбою работы устройств в составе БРЭО);

- подмена или искажение навигационных данных;

- подмена управляющей информации;

- перехват данных с полезных (целевых) нагрузок;

- специальное программное воздействие с использованием вредоносных программ (вирусов) [5, 6].

6. Ошибочные действия операторов БЛА, приводящие к их критическим отказам в ходе испытаний

Возможными причинами ошибок оператора, приводящих к возникновению критических отказов в ходе проведения испытаний опытных образцов БЛА, могут являться:

- антропометрические ограничения, ограниченность поля зрения или пониженный слух, которые могут быть вызваны яркими вспышками выстрелов и разрывами боеприпасов;

- кратковременное или длительное ухудшение психического или физического состояния здоровья операторов БЛА;

- некорректное восприятие информации, вызванное ошибками памяти, мышления и внимания;

- недостатки обучения, тренировки и подготовки операторов БЛА;

- незнание конструкции опытного образца БЛА, его основных узлов, агрегатов, принципа их работы, правил обращения с ними, правил проведения технического обслуживания и ремонта;

- незнание операторами опытных образцов БЛА, особенностей и порядка проведения испытаний, требований безопасности и др.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Выводы

Полученный опыт выполнения испытательных полетов и анализ причин возникновения авиационных происшествий с участием опытных образцов БЛА позволяет предложить следующий комплекс организационно-технических мер по обеспечению безопасности их испытаний.

1. Организационные меры по обеспечению безопасности испытаний БЛА.

1.1. К участию в испытаниях опытных образцов БЛА должны допускаться расчеты, прошедшие полный курс обучения и сдавшие зачеты на допуск к управлению БЛА и знание действующих Авиационных правил. Особое внимание в ходе обучения операторов должно быть уделено порядку действий при возникновении нештатных ситуаций и мероприятиям, направленным на выход из аварийных режимов работы.

1.2. При организации испытательных полетов БЛА (если это не противоречит методикам испытаний) необходимо придерживаться следующих рекомендаций:

а) полеты проводить на высоте от 100 м над уровнем поверхности и выполнять снижение только для выполнения действий, включенных в задание на испытание;

б) полеты на низкой высоте проводить с ограничением скорости БЛА в соответствии с требованиями ЭД;

в) следует избегать следующих аварийноопасных режимов испытательных полетов:

- полет БЛА на максимальную дальность на минимально возможной высоте полета;

- полет БЛА в режиме огибания рельефа на минимально возможной безопасной высоте при управлении высотой полета по информации от высотомера малых высот.

1.3. Материально-техническое обеспечение испытаний БЛА в обязательном порядке должно включать подробные цифровые карты местности (полигонов) проведения испытаний в целях построения безопасных маршрутов испытательных полетов.

1.4. К участию в испытаниях опытных образцов БЛА должны допускаться расчеты, прошедшие полный курс обучения и сдавшие зачеты на допуск к управлению БЛА; особое внимание в ходе обучения операторов должно быть уделено порядку действий при возникновении нештатных ситуаций и мероприятиям, направленным на выход из аварийных режимов работы.

1.5. До начала испытаний должны быть разработаны и включены в ЭД на каждый опытный образец БЛА разделы по порядку действия операторов при возникновении возможных нештатных ситуаций.

1.6. В случае применения в составе испытываемого БЛА вновь разработанных образцов авиационных огневых средств запрещается совмещать межведомственные испытания таких образцов с каким-либо другим видом испытаний БЛА.

2. Технические меры по обеспечению безопасности испытаний БЛА.

2.1. Опытные образцы БЛА должны оснащаться парашютной системой принудительной посадки, срабатывающей автоматически при возникновении нештатных ситуаций, которые могут привести к неуправляемому падению (выход значений контролируемых параметров за границы допустимых, отказы системы электропитания или составных частей), или по команде оператора. В ряде случаев, когда БЛА несет на себе взрывоопасные средства авиационного поражения большой мощности или значимый запас огнеопасного топлива, указанные опытные образцы могут оснащаться системой уничтожения в воздухе, срабатывающей автоматически при возникновении наиболее опасных ситуаций или принудительно по команде оператора.

2.2. Конструкцией опытных образцов БЛА должна быть предусмотрена защита винтов двигателей для исключения контакта с ними.

2.3. Опытные образцы БЛА должны оснащаться радиомаяками с автономным источником питания, периодически передающими свои координаты на пульт управления в течение не менее чем одних суток с целью организации успешных поисков аппаратов, потерпевших крушение.

2.4. Для проведения наиболее опасных испытаний опытные образцы БЛА должны оснащаться дополнительными устройствами контроля за состоянием их систем и агрегатов (устанавливаемыми на корпус БЛА и имеющими независимые источники питания) в целях передачи данных в режиме реального времени руководителю испытаний по собственному (зарезервированному) каналу.

2.5. Опытные образцы БЛА должны оснащаться специальными звуковыми и световыми сигналами, срабатывающими при возникновении нештатных ситуаций и предупреждающими персонал о возможном аварийном падении аппарата.

2.6. При проведении испытаний при низких температурах требуется обработка корпуса БЛА реагентами, препятствующими обледенению, а в условиях сухой солнечной погоды – антистатическими реагентами.

2.7. Опытные образцы БЛА должны оснащаться сертифицированными средствами:

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

- криптографической защиты информации;
- защиты от вредоносных программ (вирусов);

- защиты от несанкционированного доступа.

2.8. Алгоритмы проведения инженерно-штурманских расчетов должны разрабатываться с учетом всей совокупности факторов, влияющих на дальность и продолжительность полета, а также на безопасность проводимых маневров.

2.9. Алгоритмы функционирования программно-навигационного комплекса БЛА должны разрабатываться с учетом недопущения отклонения основных эксплуатационных параметров (угла атаки, коэффициента подъемной силы, максимальной скорости, динамического скоростного напора и т.д.) от нормативных значений.

2.10. Конструкцией опытных образцов БЛА должно быть предусмотрено резервирование контура управления БЛА, а также комплексирование систем ориентации и навигации различных типов.

2.11. В состав оборудования по обеспечению испытаний должны обязательно включаться аппаратура мониторинга электромагнитной обстановки в районах проведения полетов на всех этапах испытаний для изучения влияния сторонних излучений на функционирование опытного образца БЛА и его целевых нагрузок.

Литература

1. Воропаев Н.П. Применение беспилотных летательных аппаратов в интересах МЧС России // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС Российской Федерации, 2014. № 4. С.13-17.

2. Лазуткин А.В., Урванцев Р.А., Флоров А.В., Шинкевич М.В. Анализ статистических данных о полетах беспилотных летательных аппаратов серии SUPERCAM в сложных метеоусловиях для картографии и видеоразведки // Перспективы развития и применения комплексов с беспилотными летательными аппаратами. Сборник статей и докладов по материалам ежегодной научно-практической конференции, 2016. С.268-272.

3. Гулевич С.П. Обеспечение безаварийного применения беспилотных летательных аппаратов в условиях горного рельефа местности // Проблемы безопасности полетов, 2003. № 9. С.20-26.

4. Гулевич С.П., Веселов Ю.Г., Прядкин С.П., Тырнов С.Д. Анализ факторов, влияющих на безопасность полета беспилотных летательных аппаратов. Причины авиационных происшествий беспилотных летательных аппаратов и способы их предотвращения // Наука и образование, 2012. № 12. С.165-182.

5. Аменитский М.В. Анализ потенциальных угроз системы управления беспилотных летательных аппаратов средних и тяжелых классов // Труды МАИ, 2017. № 94. С.1-17.

6. Теодорович Н.Н., Строганова С.М., Абрамов П.С. Способы обнаружения и борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами // Интернет-журнал «Науковедение», 2017. № 1. С.1-7.

7. Умников Е.В., Атакищев О.И., Грачёв В.А. Методы оценки эффективности интеллектуальных систем управления в применении к имитационному моделированию робототехнических комплексов // Известия Института инженерной физики, 2018. №2(48). С.77-83.

8. Попов А.Н., Атакищев О.И., Тетерин Д.П., Батраева И.А. Матричный метод планирования траектории движения беспилотного летательного аппарата переменной массы // Известия Института инженерной физики, 2018. № 4 (50). С.93-98.

9. Атакищев О.И., Борзов Д.Б., Дрейзин В.Э., Смоляков М.В., Титенко Е.А. Аппаратно-ориентированный метод построения маршрута для бортовых систем управления робота // Информационные системы и технологии, 2018. № 5 (109). С.60-68.

10. Kostogryzov A., Nistratov A., Nistratov G., Atakishchev O., Golovin S., Grigoriev L. The Probabilistic Analysis Of The Possibilities To Keep "Organism Integrity" By Continuous Monitoring // В сборнике: Advances in Intelligent Systems Research Proceedings of the 2018 International Conference on Mathematics, Modelling, Simulation and Algorithms (MMSA 2018): electronic edition. 2018. С.432-435.

11. Kostogryzov A., Stepanov P., Atakishchev O., Nistratov G., Nistratov A., Grigoriev L. Probabilistic Modelling Processes Of Mutual Monitoring Operators Actions For Transport Systems // В сборнике: 2017 4th International Conference on Transportation Information and Safety, ICTIS 2017 - Proceedings 4. 2017. С.865-871.

12. Kostogryzov A.I., Atakishchev O.I., Nistratov A.A., Nistratov G.A., Klimov S., Grigoriev L.I. The Method Of Rational Dispatching A Sequence Of Heterogeneous Repair Works // Energetika. 2017. Т. 63. № 4. С.154-162.

13. Емельянов С.Г., Атакищев О.И., Попов С.А. Особенности моделей на основе стохастических атрибутивных метаграмматик для группового управления беспилотными летательными аппаратами // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение, 2015. № 4 (17). С.14-22.

14. Емельянов С.Г., Атакищева И.В., Атакищев О.И. Метаграмматические модели для описания вариантов сложноструктурированных стратегий управления // В сборнике: Перспективные системы и задачи управления. Материалы Второй Всероссийской научно-практической конференции, 2007. С.219-221.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 629.191

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С ШИРОТНО- ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

MATHEMATICAL MODELS OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS WITH PULSE WIDTH MODULATION

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

Альберт Миргасимович Шаймарданов

кандидат технических наук
преподаватель кафедры
ВКА имени А.Ф. Можайского
Адрес: 197198, Санкт-Петербург,
ул. Ждановская, д. 13
Тел.: +7 (812) 347-95-27
E-mail: xoxlov1984@bk.ru

Дмитрий Вячеславович Смирнов

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

Аннотация

Предлагается совершенствование способов построения математических моделей широтно-импульсных систем второго рода, а также широтно-импульсных систем первого и второго рода с переменной непрерывной частью.

Ключевые слова: широтно-импульсная модуляция, математическая модель, широтно-импульсная система первого и второго рода.

Summary

It is proposed to improve the methods of constructing mathematical models of pulse-width systems of the second kind, as well as pulse-width systems of the first and second kind with a variable continuous part.

Keywords: pulse width modulation, mathematical model, pulse width system of the first and second kind.

Введение

В настоящее время широтно-импульсная модуляция (ШИМ) активно используется в системах наземного электропитания объектов военного назначения (насосах подачи топлива, вентиляторах охлаждающих систем, подъемно-транспортном оборудовании, лифтах, системах приводов антенн, системах управления космическими аппаратами (КА) с широтно-импульсным управлением исполнительными органами). Цифровые устройства наиболее естественно вписываются в структуру систем управления с ШИМ. Это обусловлено принципом действия преобразователей кодов в аналоговые величины, в которых значение кода в дискретный момент времени преобразуется в длительность

импульса, что эквивалентно ШИМ 1-го рода (ШИМ-1).

В широтно-импульсных системах (ШИС) первого рода длительность импульсов является функцией равноотстоящей последовательности управляемой величины. На практике применяются также системы с широтно-импульсной модуляцией второго рода [1, 5-8]. Их характерной особенностью является то, что для формирования управляющего воздействия изменение управляемой величины осуществляется не в равноотстоящие моменты времени. Это затрудняет применение к ним методов, рассмотренных в [3]. Для исследования систем с ШИМ 2-ого рода (ШИМ-2) используются импульсные характеристики и передаточные функции, полученные ме-

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

тодом переменных состояний.

Во многих импульсных системах параметры и структура непрерывной части изменяются в течение каждого периода дискретности синхронно со значениями управляющего воздействия. Широтно-импульсные стабилизаторы напряжения являются примером таких систем. Анализу такого вида ШИС посвящено незначительное количество работ [4, 5, 9], причем, рассматривались системы с модуляцией только второго рода. Линейные импульсные системы с изменяющейся непрерывной частью рассматривались в [2].

Таким образом, наиболее развиты методы получения математических моделей систем ШИМ-1 с неизменной непрерывной частью. Новые результаты исследований таких систем не нашли еще применения при анализе широтно-импульсных систем второго рода. Немногочисленные работы посвящены исследованию ШИС-2 со скачкообразно меняющейся непрерывной частью и отсутствуют результаты анализа таких систем при широтно-импульсной модуляции первого рода.

Для развития методов исследования ШИМ необходимо совершенствование способов построения математических моделей широтно-импульсных систем второго рода, а также ШИС-1 и ШИС-2 с переменной непрерывной частью.

1. Математические модели широтно-импульсных систем первого рода

Большой класс систем ШИС-1 структурно можно представить схемой, показанной на рисунке 1.

Непрерывная часть описывается передаточными функциями по управляющему воздействию $W_0(p)$ и по возмущению $W_f(p)$. При этом $f(t)$ – это действующее на систему возмущение. На выходе формирующего устройства (ФУ-1) последовательность импульсов, модулированных по длительности, может принимать следующие значения:

$$U(t) = \begin{cases} h \operatorname{sgn}(e(i)), & \text{при } iT \leq t < (i + \gamma_i)T; \\ 0, & \text{при } (i - \gamma_i)T \leq t < (i + 1)T, \end{cases} \quad (1)$$

где h – постоянная амплитуда;

γ_i – скважность импульсов на i -м периоде дискретности $i=0, 1$.

На практике обычно используются формирующие устройства, имеющие линейную модуляционную характеристику с насыщением [2, 4]:

$$\gamma_i = \operatorname{sat} \frac{1}{\beta} |e(i)|. \quad (2)$$

Линейный дискретный фильтр с периодом дискретности T преобразует последовательность значений ошибки управления

$$e_1 = g(i) - y(i) \quad (3)$$

в последовательность входных величин формирующего устройства. Процесс преобразования в операторной форме записывается в виде соотношения:

$$E(z) = D(z)E_1(z). \quad (4)$$

Особенность получения математической модели импульсной системы состоит в необходимости одновременного учета дискретных и непрерывных элементов.

2. Уравнения состояния широтно-импульсных систем первого рода

Одной из основных проблем описания ШИС уравнениями состояния является получение системы совместно с формирующим устройством.

Непрерывная часть системы с ШИМ-1, показанной на рисунке 1, может быть описана уравнениями состояния [2, 8]:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + bu + mf; \\ \dot{y} &= c^T x + du + \eta \end{aligned} \quad (5)$$

где x – n -мерный вектор переменного состояния;

A – матрица размерности $n \times n$;

m, c – выходная величина;

d, η – постоянные коэффициенты;

u – векторы-столбцы длины n ;

$$x(t) = e^{A(t-t_0)}x(t_0) + \int_{t_0}^t e^{A(t-\tau)}bu(\tau)d\tau + \int_{t_0}^t e^{A(t-\tau)}mf(\tau)d\tau \quad (6)$$

Вычисление (6) при управлении (1) наиболее удобно производить, если уравнение состояния (5) записано в канонической форме [1, 4, 9], поскольку, при этом, матрица A диагональная.

Обычно решение (6) определяется при совпадении с началом периодов дискретности, по крайней мере, одного момента наблюдения век-

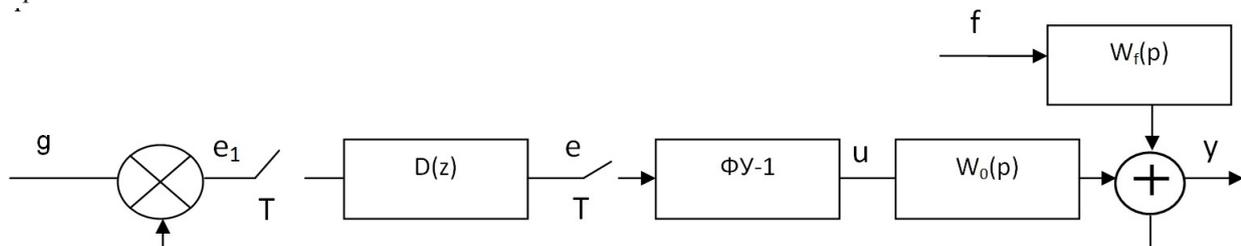


Рис. 1. Широтно-импульсная система первого рода

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

тора переменных состояния [3, 5, 6].

Вывод уравнений состояния приведенной непрерывной части (ПНЧ) в этом случае можно произвести следующим образом (для сокращения количества проводимых соотношений полагается $f = 0$).

Пусть на i -м периоде скважность управляющего воздействия дискретности равна γ_i , а на $(i+1)$ -м – γ_{i+1} . Решение уравнений (5) по правилу (6) позволяет найти уравнения состояния:

$$x(i+1+\varepsilon_i) = A_{0\varepsilon}^* x(i+\varepsilon_0) + b_{0\varepsilon}^* h \operatorname{sgn}(u(i)) + b_{1\varepsilon}^* h \operatorname{sgn}(u(i+1));$$

$$y(i+1+\varepsilon_i) = c^T x(i+1+\varepsilon_i),$$

где

$$A_{0\varepsilon}^* = e^{A(1+\varepsilon_1-\varepsilon_0)T};$$

$$b_{0\varepsilon}^* = \begin{cases} \int_0^{(1+\varepsilon_1-\varepsilon_0)T} e^{A\sigma} b d\sigma, & \text{при } 0 \leq \varepsilon_0 < \gamma_i; \\ 0, & \text{при } \gamma_i \leq \varepsilon_1 \leq 1; \end{cases}$$

$$b_{1\varepsilon}^* = \begin{cases} \int_0^{\varepsilon_1 T} e^{A\sigma} b d\sigma, & \text{при } 0 \leq \varepsilon_1 < \gamma_{i+1}; \\ \int_{(\varepsilon_1-\gamma_{i+1})T}^{\varepsilon_1 T} e^{A\sigma} b d\sigma, & \text{при } \gamma_{i+1} \leq \varepsilon_1 < 1. \end{cases} \quad (7)$$

Уравнения (7) записаны в нормальной форме, при $d = 0$.

При вычислении $b_{0\varepsilon}^*$, $b_{1\varepsilon}^*$, если матрица A неособенная, можно использовать следующее соотношение:

$$\int_{a_0}^{a_1} e^{A\sigma} b d\sigma = A^{-1} e^{Aa_1} (E - e^{A(a_0-a_1)}) b, \quad (8)$$

где E – единичная матрица;

a_0, a_1 – произвольные пределы интегрирования.

Из полученной модели приведенной непрерывной части (7), как частный случай, следуют известные уравнения систем с ШИМ [8, 9]. Например, уравнение:

$$x(i+1) = A_0^* x(i) + b_0^* h \operatorname{sgn}(u(i)) \quad (9)$$

получается при $\varepsilon_0 = \varepsilon_1 = 1$ или $\varepsilon_0 = \varepsilon_1 = 0$, когда:

$$A_0^* = e^{AT};$$

$$b_0^* = \int_{(1-\gamma_i)T}^T e^{A\sigma} b d\sigma = A^{-1} e^{AT} (E - e^{A\gamma_i T}) b. \quad (10)$$

Если же считать $\varepsilon_0 = 1$, $\varepsilon_1 = \varepsilon$, то получается уравнение:

$$x(i+\varepsilon) = A^* \varepsilon x(i) + b^* \varepsilon h \operatorname{sgn}(u(i)), \quad (11)$$

где $A^* \varepsilon = e^{A\varepsilon T}$

$$b^* \varepsilon = \begin{cases} \int_0^{\varepsilon T} e^{A\sigma} b d\sigma, & \text{при } 0 \leq \varepsilon < \gamma_i; \\ \int_{(\varepsilon-\gamma_i)T}^{\varepsilon T} e^{A\sigma} b d\sigma, & \text{при } \gamma_i \leq \varepsilon < 1. \end{cases} \quad (12)$$

Для получения модели замкнутой системы необходимо уравнения (7) дополнить разностными уравнениями дискретного фильтра (4) и уравнениями замыкания.

3. Передаточные функции широтно-импульсных систем первого рода

Передаточные функции являются иной формой математической модели систем.

Строго говоря, для ШИС понятие передаточной функции неприменимо [5, 8]. Однако из практических соображений оно используется, но при этом понимается, что передаточная функция неизменна лишь в течение одного периода дискретности и меняется от периода к периоду.

Для импульсных систем разработан метод дискретных Z -передаточных функций. Наиболее распространен переход к передаточной функции непрерывной части от уравнений состояния:

$$W_0(z, \gamma) = c^T (zE - A_0^*)^{-1} b_0^* = \frac{B_0(z, \gamma)}{C_0(z)}, \quad (13)$$

где E – единичная $n \times n$ матрица.

Такой способ получения передаточных функций является универсальным, поскольку принципиально уравнения состояния могут быть составлены для любой непрерывной части. Кроме того, имеется возможность рассматривать и управления для не равноотстоящих последовательностей (7), из которых следует:

$$W_0(z, \gamma, \varepsilon_0) = c^T (zE - A_{0\varepsilon}^*)^{-1} (b_{0\varepsilon}^* + b_{1\varepsilon}^*) = \frac{B_0(z, \gamma, \varepsilon_0, \varepsilon_1)}{C_0(z)} \quad (14)$$

При получении (14) полагалось, что $\operatorname{sgn}(u(i)) = \operatorname{sgn}(u(i+1))$.

Необходимость выполнения (13) и (14) матричных операций может существенно усложнить анализ системы. Поэтому, если для исследуемой системы

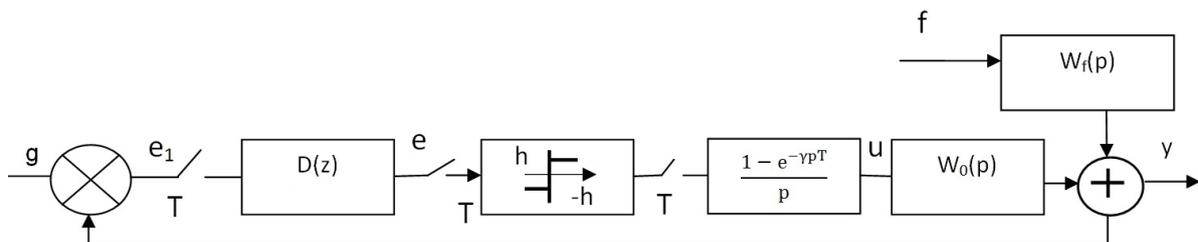


Рис. 2. Структурная схема с ШИМ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

дований ШИС нужно получить $B_0(z, \gamma)$ и $C0(z)$, предпочтительнее использовать другой способ (см. рисунок 2) [6].

Формирующее устройство описывается передаточной функцией:

$$W_f(p) = \frac{1 - e^{-\gamma p T}}{p}, \quad (15)$$

при этом, постоянство амплитуды управления учитывается введением идеального релейного звена. Тогда передаточная функция ПНЧ находится по той же формуле, что и для систем с амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ) [1, 2]:

$$W_0(z, \gamma) = \mathbf{Z} \left\{ \frac{W_0(p)}{p} \right\} = \mathbf{z}^{-1} \mathbf{Z}_\epsilon \left\{ \frac{W_0(p)}{p} \right\}. \quad (16)$$

Преимущества этого способа заключаются как в простоте получения $W_0(z, \gamma)$, так и в возможности определения передаточной функции разомкнутой части широтно-импульсной системы. Для получения передаточной функции разомкнутой части $W_f(z, \gamma)$ нужно преобразовать структурную схему (рисунок 1) так, как показано на рисунке 3 и провести вычисления [3]:

$$W_f(z, \gamma) = W_0(z, \gamma) D(z). \quad (17)$$

4. Математические модели широтно-импульсных систем с синхронным скачкообразным изменением параметров непрерывной части

Вследствие скачкообразного изменения параметров, непрерывная часть системы описывается двумя различными уравнениями состояния в течение периода дискретности, которые можно записать в нормальной форме:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \begin{cases} \mathbf{A}_1 \mathbf{x}(t) + \mathbf{b}_1 u(t), & \text{при } iT \leq t < (i + \gamma_i)T; \\ \mathbf{A}_2 \mathbf{x}(t) + \mathbf{b}_2 u(t), & \text{при } (i + \gamma_i)T \leq t < (i + 1)T. \end{cases} \quad (18)$$

Использование решения (6) и согласование значений переменных состояния на интервалах постоянства непрерывной части внутри периодов дискретности приводят к уравнениям состояния ПНЧ в дискретной форме:

$$\begin{aligned} x(i+1) &= A_\Delta^*(\gamma) x(i) + b_\Delta^*(\gamma) h \operatorname{sgn}(u(i)); \\ y(i) &= c T x(i), \end{aligned} \quad (19)$$

где

$$A_\Delta^*(\gamma_i) = e^{A_1 \gamma_i T} + A_2 (1 - \gamma_i) T;$$

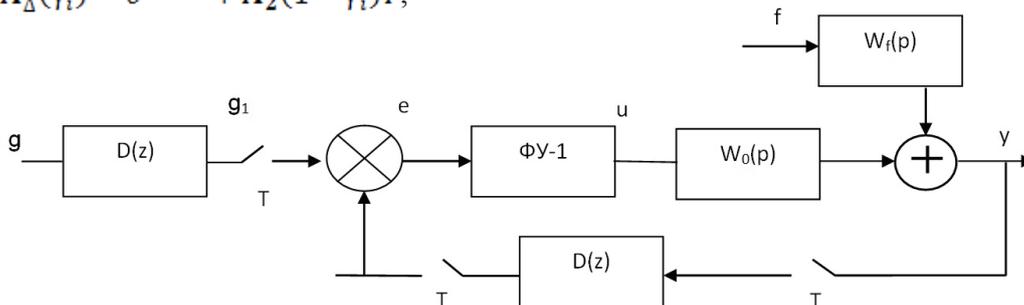


Рис. 3. Преобразованная ШИС

$$\mathbf{b}_\Delta^*(\gamma_i) = e^{A_2(1-\gamma_i)T} \int_0^{\gamma_i T} e^{A_1 \sigma} \mathbf{b}_1 d\sigma + \int_0^{(1-\gamma_i)T} e^{A_2 \sigma} \mathbf{b}_2 d\sigma. \quad (20)$$

Если передаточные функции непрерывной части имеют однократные действительные или комплексно-сопряженные полюса, то они могут быть представлены в виде:

$$W_0(p) = \begin{cases} W_1(p) = \sum_{v=1}^n \frac{R_{v1}}{p - p_{v1}}, & \text{при } iT \leq t < (i + \gamma_i)T; \\ W_2(p) = \sum_{v=1}^n \frac{R_{v2}}{p - p_{v2}}, & \text{при } (i + 1)T \leq t < (i + 1)T. \end{cases} \quad (21)$$

Тогда входящие в (18) матрицы и вектора принимают следующие значения:

$$\begin{aligned} A_1 &= \operatorname{dia} \{g\{p_1, \dots, p_{n1}\}\}; A_2 = \operatorname{dia} \{g\{p_1, \dots, p_{n2}\}\}; \\ \mathbf{b}_1^T &= (R_{11}, \dots, R_{n1}); \mathbf{b}_2^T = (R_{12}, \dots, R_{n2}). \end{aligned} \quad (22)$$

Выполнение матричных операций (20) приводит к соотношениям:

$$\begin{aligned} A_\Delta^*(\gamma_i) &= \operatorname{dia} \left\{ g \left\{ d_{11}^{\gamma_i} d_{12}^{1-\gamma_i}, \dots, d_{n1}^{\gamma_i} d_{n2}^{1-\gamma_i} \right\} \right\}; d_{vj} = e^{p_{vj} T} \\ \mathbf{b}_\Delta^T(\gamma_i) &= \left(\frac{R_{11} d_{12}^{1-\gamma_i} (d_{11}^{\gamma_i} - 1)}{P_{11}} + \frac{R_{12} (d_{12}^{1-\gamma_i} - 1)}{P_{12}} + \dots + \frac{R_{n1} d_{n1}^{1-\gamma_i} (d_{n1}^{\gamma_i} - 1)}{P_{n1}} + \frac{R_{n2} (d_{n2}^{1-\gamma_i} - 1)}{P_{n2}} \right). \end{aligned}$$

В астатической системе $P_{11} = P_{12} = 0$, поэтому:

$$d_{11}^{\gamma_i} d_{12}^{1-\gamma_i} = 1;$$

$$\frac{R_{11} d_{12}^{1-\gamma_i} (d_{11}^{\gamma_i} - 1)}{P_{11}} + \frac{R_{12} (d_{12}^{1-\gamma_i} - 1)}{P_{12}} = R_{11} T \gamma_i + R_{12} (1 - \gamma_i) T. \quad (24)$$

Использование уравнений состояния (19) для получения модели замкнутой системы, в том числе передаточных функций, можно производить как в ШИС (с постоянной непрерывной частью). Например, аналогично (13) определяется передаточная функция приведенной непрерывной части:

$$W_{O_\Delta}(z, \gamma) = c^T (zE - A^* \Delta(\gamma))^{-1} b^* \Delta(\gamma). \quad (25)$$

Применять непосредственно методы [9] для получения передаточной функции ПНЧ широтно-импульсных систем с переменной непрерывной частью не удается.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

5. Математические модели широтно-импульсных систем второго рода

5.1. Уравнения стояния систем с широтно-импульсной модуляцией второго рода

Содержащееся обычно в таких системах звено обратной связи $W_{oc}(p)$ учтено в передаточной функции непрерывной части $W_0(p)$. С выхода формирующего устройства второго рода (ФУ-2) на вход непрерывной части поступает последовательность импульсов:

$$u(t) = \begin{cases} h \operatorname{sgn}(e(i)), & \text{при } iT \leq t < (i + \gamma_i)T; \\ 0, & \text{при } (i + \gamma_i)T \leq t \leq (i + 1)T. \end{cases} \quad (26)$$

Значение скважности $\gamma_i = \tau_i T^{-1}$ определяется путем непрерывного сравнения сигнала обратной связи с модулирующим сигналом. Величина τ_i равна наименьшему положительному корню уравнения:

$$|\varepsilon(\tau - iT) - \beta \tau T^{-1}| = 0, \quad (27)$$

если таковой имеется на $[0, T]$. В противном случае $\tau_i = T$, т.е. $\gamma_i = 1$

Таким образом, последовательность значений $e(i + \gamma_i)$ является неравноотстоящей. Это обстоятельство приводит к усложнению методов анализа систем с ШИМ-2, в том числе полученных их математических моделей.

Чтобы методика исследования с ШИМ-2 с наименьшими изменениями была пригодна и для ШИС-2, нужно стремиться наиболее простым способом учесть модуляционную характеристику (27) при получении модели приведенной непрерывной части. Этому требованию удовлетворяют уравнения (7), полученные для неравноотстоящих моментов наблюдения вектора переменных состояния.

Если в (7) положить $\varepsilon_0 = \gamma_i$ и $\varepsilon_1 = \varepsilon$, то получаются уравнения следующего вида:

$$\begin{aligned} x(i-1+\varepsilon) &= A_{\varepsilon}^* x(i+\gamma_i) + b_{1\varepsilon}^* h \operatorname{sgn}(u(i+1)); \\ y(i-1+\varepsilon) &= c^T x(i-1+\varepsilon). \end{aligned} \quad (28)$$

Значение модуляционной характеристики состоит в поиске значения $\varepsilon \in [0, 1]$, при котором выполняется равенство:

$$|g(i-1+\varepsilon) - y(i-1+\varepsilon)| - \beta \varepsilon = 0. \quad (29)$$

Уравнения (27)-(28) описывают замкнутую систему с ШИМ-2 и в полученном виде пригодны для расчета процессов. Если моделирование

ведется на цифровой вычислительной машине, то необходимо многократно вычислять значения (28) и с шагом $\Delta \ll T$ проверять выполнимость (29).

Учет возмущающего воздействия производится в уравнениях состояния непрерывной части с последующим использованием решения (6), т.е. также, как и в широтно-импульсной системе первого рода.

5.2. Передаточные функции широтно-импульсных систем второго рода

В общем случае передаточную функцию приведенной непрерывной части можно найти из (30):

$$W_{02}(z, \gamma, \varepsilon) = c^T (zE - A_{\varepsilon}^*)^{-1} b_{1\varepsilon}^* = \frac{B_{02}(z, \gamma, \varepsilon)}{C_{02}(z)}. \quad (30)$$

Для исследования ШИС-2 особенно важно определить передаточную функцию приведенной непрерывной части в том случае, когда значения выходной величины рассматриваются в моменты формирования задних фронтов импульсов, т.е. при ε

$$W_0(z, \gamma, \varepsilon) = \begin{cases} z_{\varepsilon} \left\{ \frac{W_0(p)}{p} \right\}_{\varepsilon=1+\varepsilon-\gamma} - z^{-1} z_{\varepsilon} \left\{ \frac{W_0(p)}{p} \right\}_{\varepsilon=1+\varepsilon-\gamma}, & \text{при } 0 \leq \varepsilon < \gamma; \\ z_{\varepsilon} \left\{ \frac{W_0(p)}{p} \right\}_{\varepsilon=\varepsilon-\gamma} - z_{\varepsilon} \left\{ \frac{W_0(p)}{p} \right\}_{\varepsilon=\varepsilon-\gamma}, & \text{при } \gamma \leq \varepsilon < 1. \end{cases} \quad (31)$$

Для систем с ШИМ-1 значения (34) применяются в записанном виде для случаев $\varepsilon=0$ при законе модуляции (2).

Применительно к системам с ШИМ-2 из (30) можно записать аналогичное выражение:

$$\gamma_i = \operatorname{sat} \left(\frac{1}{\beta} e(i + \gamma_i) \right), \quad (32)$$

но при этом $(i+1+\gamma_{i-1})T - (i+\gamma_i)T = 0$

Будем считать, что в широтно-импульсной системе второго рода модуляционная характеристика имеет вид (35), а период дискретности меняется по следующему закону:

$$T^* = (1 + \gamma_2 - \gamma_1)T. \quad (33)$$



Рис. 4. Структурная схема системы с ШИМ-2

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Например, на $(i+1)$ -м шаге

$$T_{(i+1)}^* = (I + \gamma_{(i+1)}^{-\gamma} I) T \quad (34)$$

Тогда при ϵ

$$W_0^*(z, \gamma, \gamma) = \left\{ Z_\epsilon \left\{ \frac{W_0(p)}{p} \right\} \right\}_{\epsilon=\gamma} - Z \left\{ \frac{W_0(p)}{p} \right\} = \frac{B_{02}^*(z, \gamma, \gamma)}{C_0(z)}, \quad (35)$$

в котором период дискретности считается равным T^* . Затем в (33) нужно подставить из (34) значение T^* и упорядочить последовательность величин скважности, как это сделано при переходе от (37) к (38). В результате получается передаточная функция приведенной непрерывной части системы с ШИМ-2 в следующем виде:

$$W_{02}(z, \gamma_1, \gamma_2) = \left[Z_\epsilon \left\{ \frac{W_0(p)}{p} \right\} \right]_{\epsilon=\gamma_2} - Z \left\{ \frac{W_0(p)}{p} \right\} \Big|_{T^*=(1+\gamma_2-\gamma_1)T} \quad (36)$$

5.3. Математические модели широтно-импульсных систем второго рода с синхронным и скачкообразным изменением параметров непрерывной части

В связи с особенностью закона модуляции (30), математическую модель систем с ШИМ-2, при учете коммутируемых параметров непрерывной части, наиболее удобно составлять для неравноотстоящих моментов. Это можно сделать, если решение уравнения состояния непрерывной части (21) при (29) найти таким образом, как и в (7) были определены для ШИС-1. В результате получим:

$$x(i+1 + \epsilon_1) = A_\epsilon^* x(i + \epsilon_0) + b_{0\epsilon}^* h \operatorname{sgn}(u(i)) + b_{1\epsilon}^* h \operatorname{sgn}(u(i+1)), \quad (37)$$

где

$$A_\epsilon^* = A_0^* A_1^*, \quad b_{0\epsilon}^* = A_1^* b_{0\epsilon}^* \quad (37)$$

$$A_0^* = \begin{cases} e^{A_1(\gamma_i - \epsilon_0)T + A_2(1 - \gamma_i)T}, & \text{при } 0 \leq \epsilon_0 < \gamma_i; \\ e^{A_2(1 - \epsilon_0)T}, & \text{при } \gamma_i \leq \epsilon_0 < 1, \end{cases} \quad (38)$$

$$A_1^* = \begin{cases} e^{A_1 \epsilon T}, & \text{при } 0 \leq \epsilon_1 < \gamma_{i+1}; \\ e^{A_1 \gamma_{i+1} T + A_2(\epsilon_1 - \gamma_{i+1})T}, & \text{при } \gamma_{i+1} \leq \epsilon_1 < 1, \end{cases} \quad (39)$$

$$b_{0\epsilon}^* = \begin{cases} e^{A_2(1 - \gamma_i)T} \int_0^{(\gamma_i - \epsilon_0)T} e^{A_1 \sigma} b_1 d\sigma + \int_0^{(1 - \gamma_i)T} e^{A_2 \sigma} b_2 d\sigma, & \text{при } 0 \leq \epsilon_0 < \gamma_i; \\ \int_0^{(1 - \epsilon_0)T} e^{A_2 \sigma} b_2 d\sigma, & \text{при } \gamma_i \leq \epsilon_0 < 1, \end{cases} \quad (40)$$

$$b_{1\epsilon}^* = \begin{cases} \int_0^{\epsilon_1 T} e^{A_1 \sigma} b_1 d\sigma, & \text{при } 0 \leq \epsilon_1 < \gamma_{i+1}; \\ e^{A_2(\epsilon_1 - \gamma_{i+1})T} \int_0^{\gamma_{i+1} T} e^{A_1 \sigma} b_1 d\sigma + \int_0^{(\epsilon_1 - \gamma_{i+1})T} e^{A_2 \sigma} b_2 d\sigma, & \text{при } \gamma_{i+1} \leq \epsilon_1 < 1. \end{cases} \quad (41)$$

Если непрерывная часть имеет только однократные полюса, т.е. возможные разложения (22) и (23), то соотношения (37) – (41) принимают вид:

$$A_0^\Delta = \begin{cases} \operatorname{dia} \left(g \left\{ d_{11}^{\gamma_i - \epsilon_0} d_{12}^{1 - \gamma_i}, \dots, d_{n1}^{\gamma_i - \epsilon_0} d_{n2}^{1 - \gamma_i} \right\} \right), & \text{при } 0 \leq \epsilon_0 < \gamma_i; \\ \operatorname{dia} \left(g \left\{ d_{12}^{1 - \epsilon_0}, \dots, d_{n2}^{1 - \epsilon_0} \right\} \right), & \text{при } \gamma_i \leq \epsilon_0 < 1, \end{cases} \quad (42)$$

$$A_1^\Delta = \begin{cases} \operatorname{dia} \left(g \left\{ d_{11}^{\epsilon_1}, \dots, d_{n1}^{\epsilon_1} \right\} \right), & \text{при } 0 \leq \epsilon_1 < \gamma_{i+1}; \\ \operatorname{dia} \left(g \left\{ d_{11}^{\gamma_{i+1}} d_{12}^{\epsilon_1 - \gamma_{i+1}}, \dots, d_{n1}^{\gamma_{i+1}} d_{n2}^{\epsilon_1 - \gamma_{i+1}} \right\} \right), & \text{при } \gamma_i \leq \epsilon_0 < 1, \end{cases} \quad (43)$$

$$b_{0\epsilon}^\Delta = \begin{cases} \left(\frac{R_{11} d_{12}^{1 - \gamma_i} (d_{11}^{\gamma_i - \epsilon_0} - 1)}{P_{11}} + \frac{R_{12} (d_{12}^{1 - \gamma_i} - 1)}{P_{12}}, \dots \right), & \text{при } 0 \leq \epsilon_0 < \gamma_i; \\ \dots, \frac{R_{n1} (d_{n2}^{1 - \gamma_i - \epsilon_0} - 1)}{P_{n1}} + \frac{R_{n2} (d_{n2}^{1 - \gamma_i} - 1)}{P_{n2}}, & \\ \left(\frac{R_{12} (d_{12}^{1 - \epsilon_0} - 1)}{P_{12}}, \dots, \frac{R_{n2} (d_{n2}^{1 - \epsilon_0} - 1)}{P_{n2}} \right), & \text{при } \gamma_i \leq \epsilon_0 < 1, \end{cases} \quad (44)$$

$$b_{1\epsilon}^\Delta = \begin{cases} \left(\frac{R_{11} (d_{11}^{\epsilon_1} - 1)}{P_{11}}, \dots, \frac{R_{n1} (d_{n1}^{\epsilon_1} - 1)}{P_{n1}} \right), & \text{при } 0 \leq \epsilon_1 < \gamma_{i+1}; \\ \left(\frac{R_{11} d_{12}^{\epsilon_1 - \gamma_{i+1}} (d_{11}^{\gamma_{i+1}} - 1)}{P_{11}} + \frac{R_{12} (d_{12}^{\epsilon_1 - \gamma_{i+1}} - 1)}{P_{12}}, \dots \right), & \\ \dots, \frac{R_{n1} d_{n2}^{\epsilon_1 - \gamma_{i+1}} (d_{n1}^{\gamma_{i+1}} - 1)}{P_{n1}} + \frac{R_{n2} (d_{n2}^{\epsilon_1 - \gamma_{i+1}} - 1)}{P_{n2}} \right), & \text{при } \gamma_{i+1} \leq \epsilon_1 < 1. \end{cases} \quad (45)$$

Модуляционная характеристика и уравнение замыкания не зависят от переменности параметров непрерывной части и определяются уравнениями (30) или (32), образуя совместно с (41) математическую модель замкнутой системы.

Выводы

Рассмотренные методы описания замкнутой системы с широтно-импульсной модуляцией позволяют исследовать различные классы широтно-импульсных систем.

Наиболее универсальным является метод переменных состояния, с помощью которого возможно получение математических моделей широтно-импульсных систем первого рода с постоянными и синхронно-меняющимися параметрами непрерывной части. Определяемые при этом разностные уравнения являются готовым алгоритмом для расчета процессов в замкнутых системах.

Для импульсных систем с неизменной непрерывной частью менее трудоемким является способ описания приведенной непрерывной частью дискретной передаточной функцией.

При рассмотрении математических моделей использованы, главным образом применительно к системам с ШИМ-1, известные способы их

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

получения, а также получены новые результаты, заключающиеся в следующем:

1. Для систем с широтно-импульсной модуляцией первого рода получены уравнения приведенной непрерывной части для не равноотстоящих значений переменных состояния на двух соседних периодах дискретности. Наибольшая практическая значимость этих уравнений состоит в возможности их применения к системам с ШИМ-2 при учете закона модуляции второго рода.

2. Получено правило формирования дискретной передаточной функции приведенной непрерывной части широтно-импульсной системы второго рода, позволяющее упростить получение математической модели замкнутой системы аналогично тому, как в системах с ШИМ-1. Это позволяет с помощью известных таблиц Z-преобразований получать рекуррентные соотношения для расчета переходных процессов в ШИС-2 относительно выходной координаты и проще, без выполнения матричных операций, находить уравнения состояния.

3. Выделен класс широтно-импульсных систем с коммутируемыми синхронно с управляющим воздействием параметрами непрерывной части. Получены математические модели этих систем в форме уравнений состояния.

Литература

1. Александров Ф.И., Сиваков А.Р. Импульсные полупроводниковые преобразователи и стабилизаторы постоянного напряжения // Энергия, 2017. 188 с.

2. Ковальков В.К. Влияние входного фильтра на устойчивость процессов в импульсном стабилизаторе напряжения // Изв. Вузов СССР. Приборостроение, 2016. №11. С. 48-51.

3. Ковальков В.К., Соболев Л.Б. Расчет пульсаций в сглаживающих фильтрах импульсных преобразователей на ЦВМ // ЭТ в А.; под ред. Ю.И. Конева // Сов. Радио, 1977. №9. С. 31-137.

4. Львов Н.Н. Импульсные передаточные функции электрических цепей с полностью управляемыми ключами при питании от источников постоянного напряжения // Изв. вузов СССР. Электродинамика. №2. С.1361-1368.

5. Цыпкин Я.З. Частотные критерии абсолютной устойчивости нелинейных импульсных автоматических систем // Автоматика и телемеханика, 2016. Т.25. № 3 С. 281-289.

6. Львов Е.Л. Импульсные передаточные функции электрической цепи с полностью управляемыми ключами при питании от источников постоянного напряжения // Изв. вузов СССР. Электромеханика, 1982. № 2. С.1361-1368.

7. Львов Е.Л. Импульсные передаточные функции электрической цепи с частично-управляемым ключами при питании от источников постоянного напряжения // Изв. вузов СССР. Электроника, 1982. С.939-946.

8. Лучко С.В. Расчет импульсных и цифровых автоматических систем, 2016. 146 с.

9. Лучко С.В., Крыжановский В.И. Математические модели автоматических систем с широтно-импульсной модуляцией // Изв. вузов СССР. Приборостроение, 2015. №8. 31 с.



ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 629.191

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЛАСТИ РАЗБРОСА НАЧАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ОТДЕЛЯЮЩИХСЯ ЧАСТЕЙ С УЧЕТОМ ОПЕРАТИВНЫХ ДАННЫХ О СОСТОЯНИИ АТМОСФЕРЫ В РАЙОНАХ ПАДЕНИЯ

THE METHOD OF DETERMINING THE SCATTER REGION OF THE INITIAL MOTION PARAMETERS OF THE SEPARATING PARTS, TAKING INTO ACCOUNT THE OPERATIONAL DATA ON THE STATE OF THE ATMOSPHERE IN AREAS OF INCIDENCE

Владимир Леонидович Захаров

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

Дмитрий Вячеславович Смирнов

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

Алексей Александрович Коробков

кандидат технических наук, доцент
начальник научно-методического управления
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7 (4967) 35-31-93
E-mail: korobkow@iifmail.ru

Рафаэль Рамисович Казаков

старший преподаватель
ВКА имени А.Ф. Можайского
Адрес: 197198, Санкт-Петербург,
ул. Ждановская, д. 13
Тел.: 8 (812) 237-12-49

Аннотация

Вдоль штатных трасс запусков космических аппаратов на поверхности Земли выделяются участки для приема отделяющихся частей ракет-носителей – районы падения. Площадь этих районов рассчитывается таким образом, чтобы обеспечить попадание отработавших ступеней ракет при различных условиях запуска. Однако существует некоторая вероятность, что при значительном изменении параметров атмосферы, а именно – направления и скорости ветра, отделяющаяся часть упадет за пределы района падения. Это повлечет различные экономические и политические издержки. Рассмотренная в статье методика позволяет учесть эти изменения атмосферы и обеспечить попадание отделяющихся частей в заданные районы.

Ключевые слова: космический аппарат, ракета-носитель, отделяющиеся части, район падения, эллипс рассеивания.

Summary

Along the standard routes of launching spacecraft on the Earth's surface, there are allocated areas for receiving the separating parts of launch vehicles – areas of incidence. The area of these areas is calculated in such a way as to ensure the entry of spent rocket stages under various launch conditions. However, there is some probability that with a significant change in the parameters of the atmosphere, namely, the direction and speed of the wind, the detachable part will fall outside the area of the fall. This will entail various economic and political costs. The method considered in the article allows to take into account these changes in the atmosphere and to ensure the release of detachable parts in the specified areas.

Keywords: spacecraft, launch vehicle, detachable parts, area of fall, ellipse of dispersion.

Введение

Запуски космических аппаратов сопровождаются падением на землю отделяющихся частей (ОЧ) ракет-носителей (РН). Отделяющимися частями являются фрагменты конструкции первой

и второй ступеней. Размеры и местоположение районов падения (РП) этих частей для каждой ракеты-носителя определяются требованиями к орбитам космических аппаратов (КА), их массой, энергетическими характеристиками РН и

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

выбираются в местностях наименее заселенных, с отсутствием или минимальным ведением хозяйственной деятельности [1, 2].

Рассеивание точек падения ОЧ на некоторой координатной плоскости зависит от большого числа возмущающих факторов, действующих как на РН в процессе его движения на активном участке траектории, так и на ОЧ после их отделения от РН [3-5]. Координаты точки падения ОЧ – абсцисса и ордината – являются случайными величинами, которые образуют собой эллипс рассеивания (ЭР). При значительном изменении параметров атмосферы от стандартных значений фактические районы падения ОЧ РН, как правило, не совпадают с заданными (специально отведенными) районами. Обеспечить попадание ОЧ в заранее заданные районы можно путем изменения (коррекции) траектории движения РН на активном участке.

Изменение траектории выведения РН может быть осуществлено путем изменения алгоритмов управления РН [6, 7]. Поскольку при проектировании системы управления РН стремятся обеспечить оптимальные значения выбранных показателей качества функционирования (минимум расхода топлива или максимум выводимой на орбиту полезной нагрузки и т.д.), то всякие коррекции алгоритма неизбежно ухудшают эти показатели [1]. Таким образом, возникает задача выведения КА в заданную область космического пространства и обеспечения падения ОЧ РН в заданные районы земной поверхности при отклонениях параметров атмосферы и ветра от стандартных значений.

1. Решение задачи определения области разброса начальных параметров движения ОЧ РН, обеспечивающей падение ОЧ в РП

Рассмотрим *рисунок 1*. На нем область разброса начальных параметров движения ОЧ,

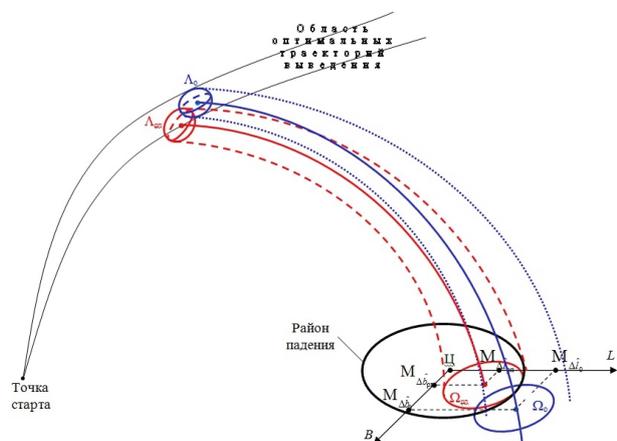


Рис. 1. Определение области разброса начальных параметров движения ОЧ

соответствующая оптимальным траекториям выведения РН, представляет собой эллипсоид, размеры и положение которого определяются математическим ожиданием и ковариационной матрицей.

При стандартных параметрах атмосферы движение ОЧ, начавшееся в пределах области, завершится внутри отведенного района падения, причем центр области рассеивания точек падения совпадет с началом координат – точкой Ц.

При отклонении параметров атмосферы от стандартных значений и ветре, центр ЭР смещается относительно точки Ц и размеры его также могут изменяться. Если имеется информация о состоянии атмосферы в районе падения ОЧ, полученная по результатам ее зондирования перед пуском РН, то представляется возможным определить характеристики ЭР [8].

Пусть область Ω_0 , характеризующая ЭР при стандартных начальных условиях и район, отведенный для падения ОЧ, располагаются друг относительно друга, как показано на *рисушке 1*. Вероятность падения ОЧ в заданный район меньше заданного значения $P_{зад}$.

Обеспечить падение ОЧ в отведенный район земной поверхности при реальных характеристиках атмосферных возмущений можно, как уже отмечалось, только путем изменения начальных условий движения. При изменении параметров эллипсоида, характеризующего начальные условия, положение и параметры эллипса рассеивания точек падения ОЧ также будут изменяться. В частности, можно найти такие характеристики начальных параметров движения ОЧ, которые обеспечат перемещение области рассеивания точек падения внутрь отведенного района. При этом необходимо, чтобы эллипс, ограничивающий область рассеивания, как минимум, касался границы района падения. На *рисушке 1*, полученная таким образом область, обозначена $\Omega_{РП}$.

Область начальных параметров движения ОЧ, обеспечивающая его падение в пределах области $\Omega_{РП}$ с учетом реального состояния погодных условий, обозначена $A_{РП}$. Полагается, что $A_{РП}$ также, как и Ω_0 , описывается эллипсоидом, размеры и положение которого в пространстве определяются математическим ожиданием $M_{\Delta X_{РП}}$ и ковариационной матрицей $K_{\Delta X_{РП}}$.

Определить параметры $M_{\Delta X_{РП}}$ и $K_{\Delta X_{РП}}$ области $A_{РП}$ можно путем решения обратной задачи [9-13]. Исходными данными являются характеристики $M_{\Delta c}, K_{\Delta c}, \bar{m}_p, \sigma_p, \bar{m}_u, \sigma_u, \bar{m}_v, \sigma_v$ действующих на ОЧ возмущений, а также параметры $M_{\Delta R_{РП}}$ и $K_{\Delta R_{РП}}$, характеризующие район, в который должна упасть ОЧ.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Параметры $\mathbf{M}_{\Delta X_{RP}}^{\wedge}$ и $\mathbf{K}_{\Delta X_{RP}}^{\wedge}$ области L_{RP} могут определяться по-разному. В зависимости от этого будет изменяться качество решения целей задачи РН. Очевидно, что потери качества решения целевой задачи будут тем меньше, чем ближе область L_{RP} будет находиться к оптимальной области разброса начальных параметров движения ОЧ L_0 .

Поскольку область L_{RP} характеризуется вектором $\mathbf{M}_{\Delta X_{RP}}^{\wedge}$ и матрицей $\mathbf{K}_{\Delta X_{RP}}^{\wedge}$, а область L_0 – вектором $\mathbf{M}_{\Delta X_0}^{\wedge}$ и матрицей $\mathbf{K}_{\Delta X_0}^{\wedge}$, то в качестве параметра $\mathbf{M}_{\Delta X_{RP}}^{\wedge}$ следует взять:

$$\arg \min_{\mathbf{M}_{\Delta X_{RP}}^{\wedge}} \left[\left(\mathbf{M}_{\Delta X_{RP}}^{\wedge} - \mathbf{M}_{\Delta X_0}^{\wedge} \right)^T \mathbf{W}_M \left(\mathbf{M}_{\Delta X_{RP}}^{\wedge} - \mathbf{M}_{\Delta X_0}^{\wedge} \right) \right] \quad (1)$$

при условии

$$\mathbf{M}_{\Delta R_{RP}}^{\wedge} = \mathbf{A}_X \mathbf{M}_{\Delta X_0}^{\wedge} + \mathbf{A}_c \mathbf{M}_{\Delta c}^{\wedge} + \mathbf{A}_p \mathbf{M}_{\Delta p}^{\wedge} + \mathbf{A}_u \mathbf{M}_{\Delta u}^{\wedge} + \mathbf{A}_v \mathbf{M}_{\Delta v}^{\wedge} \quad (2)$$

где \mathbf{W}_M – симметричная матрица весовых коэффициентов, позволяющая изменять вес слагаемых в квадратичной форме (1). В частном случае она может быть единичной.

Аналогично, в качестве матрицы берется:

$$\arg \min_{\mathbf{K}_{\Delta X_{RP}}^{\wedge}} \text{tr} \left[\left(\mathbf{K}_{\Delta X_{RP}}^{\wedge} - \mathbf{K}_{\Delta X_0}^{\wedge} \right)^T \left(\mathbf{K}_{\Delta X_{RP}}^{\wedge} - \mathbf{K}_{\Delta X_0}^{\wedge} \right) \right] \quad (3)$$

при условии

$$\mathbf{K}_{\Delta R_{RP}}^{\wedge} = \mathbf{A}_X \mathbf{K}_{\Delta X_0}^{\wedge} \mathbf{A}_X^T + \mathbf{A}_c \mathbf{K}_{\Delta c}^{\wedge} \mathbf{A}_c^T + \mathbf{A}_p \mathbf{K}_{\Delta p}^{\wedge} \mathbf{A}_p^T + \mathbf{A}_u \mathbf{K}_{\Delta u}^{\wedge} \mathbf{A}_u^T + \mathbf{A}_v \mathbf{K}_{\Delta v}^{\wedge} \mathbf{A}_v^T \quad (4)$$

где $\text{tr}[\dots]$ – обозначает функцию определения следа матрицы.

Для вычисления (1), (2) используется метод неопределенных множителей Лагранжа, в соответствии с которым минимизируемая функция имеет вид:

$$\mathbf{L}_M = \left(\mathbf{M}_{\Delta X_{RP}}^{\wedge} - \mathbf{M}_{\Delta X_0}^{\wedge} \right)^T \mathbf{W}_M \left(\mathbf{M}_{\Delta X_{RP}}^{\wedge} - \mathbf{M}_{\Delta X_0}^{\wedge} \right) + 2\bar{\boldsymbol{\mu}}^T \left(\mathbf{A}_X \mathbf{M}_{\Delta X_0}^{\wedge} + \mathbf{A}_c \mathbf{M}_{\Delta c}^{\wedge} + \mathbf{A}_p \mathbf{M}_{\Delta p}^{\wedge} + \mathbf{A}_u \mathbf{M}_{\Delta u}^{\wedge} + \mathbf{A}_v \mathbf{M}_{\Delta v}^{\wedge} - \mathbf{M}_{\Delta R_{RP}}^{\wedge} \right) \quad (5)$$

где $\bar{\boldsymbol{\mu}}$ – вектор-столбец неопределенных множителей Лагранжа той же размерности, что и $\text{tr}[\dots]$, т.е. 2×1 .

Определяются первые производные от функции \mathbf{L}_M по векторам $\mathbf{M}_{\Delta X_{RP}}^{\wedge}$ и $\bar{\boldsymbol{\mu}}$:

$$\frac{\partial \mathbf{L}_M}{\partial \mathbf{M}_{\Delta X_{RP}}^{\wedge}} = 2 \left[\mathbf{W}_M \left(\mathbf{M}_{\Delta X_{RP}}^{\wedge} - \mathbf{M}_{\Delta X_0}^{\wedge} \right) + \mathbf{A}_X^T \bar{\boldsymbol{\mu}} \right], \quad (6)$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}_M}{\partial \bar{\boldsymbol{\mu}}} = 2 \left(\mathbf{A}_X \mathbf{M}_{\Delta X_0}^{\wedge} + \mathbf{A}_c \mathbf{M}_{\Delta c}^{\wedge} + \mathbf{A}_p \mathbf{M}_{\Delta p}^{\wedge} + \mathbf{A}_u \mathbf{M}_{\Delta u}^{\wedge} + \mathbf{A}_v \mathbf{M}_{\Delta v}^{\wedge} - \mathbf{M}_{\Delta R_{RP}}^{\wedge} \right). \quad (7)$$

Приравнивание к нулю этих производных дает два уравнения для вычисления векторов

$$\mathbf{M}_{\Delta X_{RP}}^{\wedge} \text{ и } \bar{\boldsymbol{\mu}}: \quad \mathbf{W}_M \left(\mathbf{M}_{\Delta X_{RP}}^{\wedge} - \mathbf{M}_{\Delta X_0}^{\wedge} \right) + \mathbf{A}_X^T \bar{\boldsymbol{\mu}} = 0, \quad (8)$$

$$\mathbf{A}_X \mathbf{M}_{\Delta X_0}^{\wedge} + \mathbf{A}_c \mathbf{M}_{\Delta c}^{\wedge} + \mathbf{A}_p \mathbf{M}_{\Delta p}^{\wedge} + \mathbf{A}_u \mathbf{M}_{\Delta u}^{\wedge} + \mathbf{A}_v \mathbf{M}_{\Delta v}^{\wedge} = \mathbf{M}_{\Delta R_{RP}}^{\wedge}. \quad (9)$$

Из уравнения (8) определяется вектор

$$\mathbf{M}_{\Delta X_{RP}}^{\wedge} = \mathbf{M}_{\Delta X_0}^{\wedge} - \mathbf{W}_M^{-1} \mathbf{A}_X^T \bar{\boldsymbol{\mu}}. \quad (10)$$

После подстановки в (9) уравнение примет вид:

$$\mathbf{M}_{\Delta R_{RP}}^{\wedge} = \mathbf{A}_X \mathbf{M}_{\Delta X_0}^{\wedge} - \mathbf{A}_X \mathbf{W}_M^{-1} \mathbf{A}_X^T \bar{\boldsymbol{\mu}} + \mathbf{A}_c \mathbf{M}_{\Delta c}^{\wedge} + \mathbf{A}_p \mathbf{M}_{\Delta p}^{\wedge} + \mathbf{A}_u \mathbf{M}_{\Delta u}^{\wedge} + \mathbf{A}_v \mathbf{M}_{\Delta v}^{\wedge}. \quad (11)$$

Из уравнения (11) определяется вектор неопределенных множителей Лагранжа:

$$\bar{\boldsymbol{\mu}} = \left(\mathbf{A}_X \mathbf{W}_M^{-1} \mathbf{A}_X^T \right)^{-1} \left(\mathbf{A}_X \mathbf{M}_{\Delta X_0}^{\wedge} + \mathbf{A}_c \mathbf{M}_{\Delta c}^{\wedge} + \mathbf{A}_p \mathbf{M}_{\Delta p}^{\wedge} + \mathbf{A}_u \mathbf{M}_{\Delta u}^{\wedge} + \mathbf{A}_v \mathbf{M}_{\Delta v}^{\wedge} - \mathbf{M}_{\Delta R_{RP}}^{\wedge} \right). \quad (12)$$

Подстановка $\bar{\boldsymbol{\mu}}$ в правую часть (10) дает окончательное решение задачи (1), (2):

$$\mathbf{M}_{\Delta X_{RP}}^{\wedge} = \mathbf{M}_{\Delta X_0}^{\wedge} - \mathbf{W}_M^{-1} \mathbf{A}_X^T \left(\mathbf{A}_X \mathbf{W}_M^{-1} \mathbf{A}_X^T \right)^{-1} \left(\mathbf{A}_X \mathbf{M}_{\Delta X_0}^{\wedge} + \mathbf{A}_c \mathbf{M}_{\Delta c}^{\wedge} + \mathbf{A}_p \mathbf{M}_{\Delta p}^{\wedge} + \mathbf{A}_u \mathbf{M}_{\Delta u}^{\wedge} + \mathbf{A}_v \mathbf{M}_{\Delta v}^{\wedge} - \mathbf{M}_{\Delta R_{RP}}^{\wedge} \right). \quad (13)$$

Проверка правильности полученного решения осуществляется путем подстановки вектора $\mathbf{M}_{\Delta X_{RP}}^{\wedge}$ в уравнение (2), которое при этом превращается в тождество.

В основу решения задачи определения ковариационной матрицы $\mathbf{K}_{\Delta X_{RP}}^{\wedge}$ (3), (4) также положен метод неопределенных множителей Лагранжа.

Минимизируемая функция имеет вид:

$$\mathbf{L}_K = \text{tr} \left[\left(\mathbf{K}_{\Delta X_{RP}}^{\wedge} - \mathbf{K}_{\Delta X_0}^{\wedge} \right)^T \left(\mathbf{K}_{\Delta X_{RP}}^{\wedge} - \mathbf{K}_{\Delta X_0}^{\wedge} \right) + 2\mathbf{Q}^T \left(\mathbf{A}_X \mathbf{K}_{\Delta X_{RP}}^{\wedge} \mathbf{A}_X^T + \mathbf{A}_c \mathbf{K}_{\Delta c}^{\wedge} \mathbf{A}_c^T + \mathbf{A}_p \mathbf{K}_{\Delta p}^{\wedge} \mathbf{A}_p^T + \mathbf{A}_u \mathbf{K}_{\Delta u}^{\wedge} \mathbf{A}_u^T + \mathbf{A}_v \mathbf{K}_{\Delta v}^{\wedge} \mathbf{A}_v^T - \mathbf{K}_{\Delta R_{RP}}^{\wedge} \right) \right] \quad (14)$$

где \mathbf{Q} – матрица неопределенных коэффициентов, размерности 2×2 .

Частные производные от функции \mathbf{L}_K по матрицам $\mathbf{K}_{\Delta X_{RP}}^{\wedge}$ и \mathbf{Q} определяются по формулам:

$$\frac{\partial \mathbf{L}_K}{\partial \mathbf{K}_{\Delta X_{RP}}^{\wedge}} = 2 \left(\mathbf{K}_{\Delta X_{RP}}^{\wedge} - \mathbf{K}_{\Delta X_0}^{\wedge} + \mathbf{A}_X^T \mathbf{Q} \mathbf{A}_X \right),$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}_K}{\partial \mathbf{Q}} = 2 \left(\mathbf{A}_X \mathbf{K}_{\Delta X_{RP}}^{\wedge} \mathbf{A}_X^T + \mathbf{A}_c \mathbf{K}_{\Delta c}^{\wedge} \mathbf{A}_c^T + \mathbf{A}_p \mathbf{K}_{\Delta p}^{\wedge} \mathbf{A}_p^T + \mathbf{A}_u \mathbf{K}_{\Delta u}^{\wedge} \mathbf{A}_u^T + \mathbf{A}_v \mathbf{K}_{\Delta v}^{\wedge} \mathbf{A}_v^T - \mathbf{K}_{\Delta R_{RP}}^{\wedge} \right). \quad (15)$$

Приравнивание производных к нулю дает уравнения:

$$\mathbf{K}_{\Delta X_{RP}}^{\wedge} - \mathbf{K}_{\Delta X_0}^{\wedge} + \mathbf{A}_X^T \mathbf{Q} \mathbf{A}_X = 0, \quad (16)$$

$$\mathbf{A}_X \mathbf{K}_{\Delta X_{RP}}^{\wedge} \mathbf{A}_X^T + \mathbf{A}_c \mathbf{K}_{\Delta c}^{\wedge} \mathbf{A}_c^T + \mathbf{A}_p \mathbf{K}_{\Delta p}^{\wedge} \mathbf{A}_p^T + \mathbf{A}_u \mathbf{K}_{\Delta u}^{\wedge} \mathbf{A}_u^T + \mathbf{A}_v \mathbf{K}_{\Delta v}^{\wedge} \mathbf{A}_v^T - \mathbf{K}_{\Delta R_{RP}}^{\wedge} = 0. \quad (17)$$

Подстановка матрицы

$$\mathbf{K}_{\Delta X_{RP}}^{\wedge} = \mathbf{K}_{\Delta X_0}^{\wedge} - \mathbf{A}_X^T \mathbf{Q} \mathbf{A}_X \quad (18)$$

найденной из уравнения (16), в уравнение (17) позволяет получить уравнение для определения матрицы неопределенных коэффициентов \mathbf{Q} :

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

$$A_X \left(K_{\Delta}^{\text{---}} - A_{\Delta}^T O A_{\Delta} \right) A_{\Delta}^T + A_{\Delta} K_{\Delta}^{\text{---}} A_{\Delta}^T + A_{\Delta} K_{\Delta}^{\text{---}} A_{\Delta}^T + A_{\Delta} K_{\Delta}^{\text{---}} A_{\Delta}^T + A_{\Delta} K_{\Delta}^{\text{---}} A_{\Delta}^T - K_{\Delta R_{PP}}^{\text{---}} = 0 \quad (19)$$

и саму матрицу:

$$Q \left(A_X A_X^T \right)^{-1} \left(A_X K_{\Delta X_0}^{\text{---}} A_X^T + A_c K_{\Delta c}^{\text{---}} A_c^T + A_p K_{\Delta p}^{\text{---}} A_p^T + A_u K_{\Delta u}^{\text{---}} A_u^T + A_v K_{\Delta v}^{\text{---}} A_v^T - K_{\Delta R_{PP}}^{\text{---}} \right) \left(A_X A_X^T \right)^{-1}. \quad (20)$$

Окончательное решение задачи (3), (4) находится путем подстановки матрицы Q в уравнение (18):

$$K_{\Delta R_{PP}}^{\text{---}} = K_{\Delta X_0}^{\text{---}} - A_X^T \left(A_X A_X^T \right)^{-1} \left(A_X K_{\Delta X_0}^{\text{---}} A_X^T + A_c K_{\Delta c}^{\text{---}} A_c^T + A_p K_{\Delta p}^{\text{---}} A_p^T + A_u K_{\Delta u}^{\text{---}} A_u^T + A_v K_{\Delta v}^{\text{---}} A_v^T - K_{\Delta R_{PP}}^{\text{---}} \right) \left(A_X A_X^T \right)^{-1} A_X \quad (21)$$

Правильность полученного решения несложно проверить путем подстановки матрицы $K_{\Delta R_{PP}}^{\text{---}}$ в уравнение (4).

2. Пример использования методики

Полученные результаты используются в методике определения допустимых областей разброса начальных параметров движения отделяющихся частей РН с учетом ограничений на районы падения и требований к точности выведения КА.

В качестве примера ее применения предлагается смоделировать возмущенное движение ОЧ РН для РН типа «Союз-2».

Исходные данные:

- большая полуось РП $L = 22$ км;
- малая полуось РП $B = 12$ км;
- координаты центра масс ОЧ в момент отделения от РН:

Тип ОЧ	t, c	x_c, m	y_c, m	z_c, m	$V_{x_c}, m/c$	$V_{y_c}, m/c$	$V_{z_c}, m/c$
ОЧ-1	118,20	48 419	43 320	-4 676	1 554,97	840,89	-175,67

- масса первой ступени 4 765 кг;
- отделение происходит на высоте 80 км.

При изменении математического ожидания и дисперсии меридиональной и зональной составляющих скорости ветра на 80% от расчетных, полученный ЭР Ω_0 выходит за пределы РП. Это означает, что при значительном изменении направления и скорости ветра ОЧ может упасть за границы РП, что может повлечь за собой нанесение вреда здоровью населения, экологии и объектов, находящихся вблизи РП.

После решения оптимизационной задачи, определен ЭР Ω_{PP} , лежащий внутри РП, и минимально отдаленный от расчетного.

Характеристики ЭР с учетом атмосферных возмущений при расчетных начальных условиях:

$$M_{\Omega_0} = \begin{bmatrix} -5,05 \cdot 10^3 \\ 7,59 \cdot 10^3 \end{bmatrix}, K_{\Omega_0} = \begin{bmatrix} 1,04 \cdot 10^6 & 1,02 \cdot 10^6 \\ 1,02 \cdot 10^6 & 2,11 \cdot 10^7 \end{bmatrix}.$$

Характеристики ЭР, лежащего внутри РП:

$$M_{\Omega_0} = \begin{bmatrix} -0,70 \cdot 10^3 \\ 8,35 \cdot 10^3 \end{bmatrix}, K_{\Omega_0} = \begin{bmatrix} 1,04 \cdot 10^6 & 1,02 \cdot 10^6 \\ 1,02 \cdot 10^6 & 2,11 \cdot 10^7 \end{bmatrix}.$$

По полученным результатам видно, что центр ЭР Ω_{PP} , лежащий внутри РП, сместился по дальности на 0,76 км и по боку на 4,35 км относительно центра ЭР Ω_0 . При этом размеры Ω_{PP} , характеризующиеся ковариационной матрицей $K_{\Omega_{PP}}$, практически не изменились относительно K_{Ω_0} .

Далее решена обратная задача по определению области разброса начальных параметров движения ОЧ РН A_{PP} , в которой необходимо произвести отделение ОЧ, чтобы обеспечить их попадание в РП. По выражениям (13) и (21) определены характеристики A_{PP} , представленные ниже.

Характеристики области разброса начальных параметров движения ОЧ, соответствующей оптимальным траекториям выведения РН:

$$M_{A_0} = \begin{bmatrix} 0,51 \cdot 10^3 \\ -0,03 \cdot 10^3 \\ -2,46 \cdot 10^3 \\ 0,00 \cdot 10^3 \\ -0,02 \cdot 10^3 \\ -0,06 \cdot 10^3 \end{bmatrix},$$

$$K_{A_0} = \begin{bmatrix} 5,49 \cdot 10^3 & 2,8 \cdot 10^3 & 2,37 \cdot 10^3 & 111,75 & 51,77 & 55,45 \\ 2,8 \cdot 10^3 & 4,07 \cdot 10^3 & 2,55 \cdot 10^3 & 51,65 & 99,39 & 60,73 \\ 2,37 \cdot 10^3 & 2,55 \cdot 10^3 & 8,48 \cdot 10^4 & 97,19 & 115,51 & 2,05 \cdot 10^3 \\ 111,75 & 51,65 & 97,19 & 2,32 & 1,16 & 2,38 \\ 51,77 & 99,39 & 115,51 & 1,16 & 2,84 & 2,91 \\ 55,45 & 60,73 & 2,05 \cdot 10^3 & 2,38 & 2,91 & 50,57 \end{bmatrix}$$

Характеристики области начальных условий, обеспечивающей падение ОЧ в заданный эллипс рассеивания:

$$M_{A_{PP}} = \begin{bmatrix} 4,85 \cdot 10^3 \\ 0,92 \cdot 10^3 \\ -0,63 \cdot 10^3 \\ 0,00 \cdot 10^3 \\ -0,00 \cdot 10^3 \\ -0,00 \cdot 10^3 \end{bmatrix},$$

$$K_{A_{PP}} = \begin{bmatrix} 5,49 \cdot 10^3 & 2,8 \cdot 10^3 & 2,37 \cdot 10^3 & 111,75 & 51,77 & 55,45 \\ 2,8 \cdot 10^3 & 4,07 \cdot 10^3 & 2,55 \cdot 10^3 & 51,65 & 99,39 & 60,73 \\ 2,37 \cdot 10^3 & 2,55 \cdot 10^3 & 8,48 \cdot 10^4 & 97,19 & 115,51 & 2,05 \cdot 10^3 \\ 111,75 & 51,65 & 97,19 & 2,32 & 1,16 & 2,38 \\ 51,77 & 99,39 & 115,51 & 1,16 & 2,84 & 2,91 \\ 55,45 & 60,73 & 2,05 \cdot 10^3 & 2,38 & 2,91 & 50,57 \end{bmatrix}$$

При сравнении полученных характеристик $K_{A_{PP}}$ и K_{A_0} можно сделать вывод, что размеры и форма эллипсоида, описывающего область разброса начальных параметров движения ОЧ, изменяется не более чем на 5%. Центр ЭР, описываемый математическим ожиданием $M_{A_{PP}}$, сместился относительно центра $M_{A_{PP}}$ расчетного по оси X на -5,36 км, по оси Y на 0,95 км, а по оси Z на 1,83 км.

Полученные результаты численно доказывают незначительное смещение области начальных условий, обеспечивающей падение ОЧ в заданный эллипс рассеивания.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Терминальное наведение второй ступени РН (что характерно для РН типа «Союз-2») позволит минимизировать отклонение РН и войти в область оптимальных траекторий движения, что гарантирует выведение КА в заданную область космического пространства, и при этом, будет обеспечено падение ОЧ в заданный район.

Заключение

Полученные характеристики $M_{\Delta x_{pp}}$ и $K_{\Delta x_{pp}}$ определяют размеры и положение в пространстве эллипсоида, описывающего область L_{pp} , в пределах которой необходимо произвести отделение ОЧ от РН. Эта область максимально приближена к оптимальной области L_0 , а, следовательно, обеспечивает минимальное снижение качества решения целевой задачи РН. С другой стороны, пассивное движение ОЧ, начавшееся в пределах области L_{pp} найденной с учетом реального состояния атмосферы, гарантирует падение ОЧ в заданный район земной поверхности Ω_{pp} .

Литература

1. Сихарулидзе Ю.Г. Баллистика летательных аппаратов // Наука, 1982. 352 с.
2. Смирнов Д.В., Алешин В.И., Коробков А.А., Фуров А.Н., Свистунов А.В., Кондрашин М.А. Методы обеспечения безопасности полетов околоземных космических аппаратов при условии наличия космического мусора // Известия Института инженерной физики, 2013. №3(29). С.27-31.
3. Смирнов Д.В., Кузнецов О.П., Фуров А.Н., Коробков А.А., Кондрашин М.А. Методический подход определения возможности перехвата космических тел в атмосфере // Ученые записки Тамбовского отделения РосМУ, 2014. №2. С.268-274.
4. Кузнецов О.П., Алаторцев А.И., Коробков А.А., Фуров А.Н. Методический подход к автоматизации процесса получения адекватных оценок живучести гиперзвуковых летательных аппаратов в полете // Известия Института инженерной физики, 2015. №4(38). С.85-89.
5. Smirnov D.V., Korobkov A.A. Methods of piecewise continuous control for spacecraft with solid-fueled engine at the boost fade phase (Способы кусочно-непрерывного управления космическим аппаратом с твердотопливным двигателем на фазе затухания наддува) // International Journal of Applied Engineering Research, 2015. Т.10. №20. P.41110-41120.
6. Смирнов Д.В., Алаторцев А.И., Фуров А.Н. Способ управления беспилотным летательным аппаратом в условиях внешних воздействий средств противовоздушной обороны // Известия Института инженерной физики, 2016. №1(39). С.72-74.
7. Смирнов Д.В., Алаторцев А.И. Способ формирования команды включения двигательных установок космического летательного аппарата для обеспечения его пространственного маневра на баллистическом участке траектории // Известия Института инженерной физики. 2015. №1(35). С.36-39.
8. Эльясберг П.Е. Определение движения по результатам измерений. М.: Наука, 1976. 415 с.
9. Миронов В.И. Эффективность, надежность и испытания систем управления: учеб. пособие. МО СССР, 1981. 200 с.
10. Пугачев В.С. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Наука, 1979. 496 с.
11. Арсеньев В.Н. Новые методы принятия решений при ограниченных экспериментальных данных. ВИКУ им. А.Ф. Можайского, 1999. 90 с.
12. Smirnov D.V., Korobkov A.A. Complex calculation of the flight technical characteristics of a descent space vehicle (Комплексный расчет летно-технических характеристик спускаемого космического аппарата) // International Journal of Applied Engineering Research, 2015. Т.10. №20. P. 40914-40922.
13. Коробков А.А. Методика определения параметров движения гиперзвуковых летательных аппаратов // Известия Института инженерной физики, 2010. № 3(17). С.13-16.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 656.25

ОПРЕДЕЛЕНИЕ В РАМКАХ МЕТОДИКИ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ЦЕЛОСТНОСТИ ОТВЕТСТВЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ АЛС НА БАЗЕ ШИРОКОВЕЩАТЕЛЬНОГО РАДИОКАНАЛА ПРОЦЕДУРЫ ОБНОВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ БЕЗОПАСНОСТИ

THE DEFINITION OF THE UPDATE PROCEDURE FOR SECURITY PARAMETERS, APPLIED WITHIN THE METHOD FOR CONSTRUCTING INTEGRITY MONITORING SYSTEMS FOR CRITICAL INFORMATION IN ALS BASED ON BROADCAST RADIO CHANNEL

Александр Михайлович Коротин
младший научный сотрудник
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7 (4967) 35-31-93
E-mail: alexkor91@gmail.com

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

Аннотация

В данной статье приведено описание четвертого этапа методики построения систем контроля целостности (СКЦ) ответственной информации, передаваемой автоматической локомотивной сигнализацией на базе широковещательного радиоканала (АЛС-ШР). Предложен алгоритм разработки процедуры обновления параметров безопасности СКЦ, учитывающий необходимость применения альтернативных вариантов доставки параметров СКЦ в станционные и бортовые части АЛС-ШР. Полученная в конечном итоге методика позволяет определить значения параметров построения СКЦ, на основе которых должна производиться разработка архитектуры СКЦ и выбор используемых СЗИ, или сделать вывод о невозможности построения безопасной СКЦ для данной АЛС-ШР.

Ключевые слова: автоматическая локомотивная сигнализация, АЛС на базе широковещательного радиоканала, система контроля целостности, методика построения СКЦ, алгоритм выбора процедуры обновления параметров безопасности СКЦ.

Summary

The article describes the fourth stage of the method for constructing integrity monitoring systems (IMS) for critical information transmitted by automatic locomotive signaling based on broadcast radio channel (ALS-BR). An algorithm for developing an updating procedure for IMS safety parameters, which takes into account the necessity to use alternative options for delivering IMS safety parameters to the station and onboard parts of the ALS-BR, is proposed. Finally obtained method allows us to determine the values of the IMS construction parameters, on the basis of which the IMS architecture should be developed and the selection of the information security tools used should be done, or to conclude that it is impossible to build a secure IMS for a given ALS-BR.

Keywords: automatic locomotive signaling, ALS based on broadcast radio channel, integrity monitoring system, method for constructing IMS, algorithm of the choice of update procedure for IMS security parameters.

Введение

Данная статья является продолжением цикла статей [1, 2], посвященных решению задачи разработки методики построения СКЦ, учитывающей свойства и существующие особенности систем АЛС-ШР, отличающие их друг от друга. Как уже отмечалось, данная задача обусловлена

невозможностью построения унифицированной СКЦ, применимой для любой АЛС-ШР [3]. В рамках данной статьи приводится алгоритм разработки процедуры обновления параметров СКЦ, необходимой для решения задачи управления данными параметрами [4].

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Разработка процедуры обновления параметров безопасности СКЦ

На четвертом этапе методики разрабатывается процедура обновления параметров безопасности СКЦ. Для ее разработки необходимо получить формулы вычисления параметров $I_{обн}^c$ и $I_{обн}^l$, определяющих количество информации, которое может быть передано в рамках процедуры обновления по радиоканалу АЛС-ШР. Данные формулы, аналогично третьему этапу [2], должны быть верны в случае использования общего радиоканала для передачи станционных и бортовых сообщений, а также учитывать выбранные механизмы защиты от угроз безопасности ответственной информации. Кроме того, если доставка параметров контроля целостности в станционную и бортовые части АЛС-ШР невозможна в рамках процедуры аутентификации, должны быть определены варианты альтернативной доставки параметров. В качестве альтернативных вариантов доставки требуется рассмотреть доставку с использованием сторонних каналов связи («предварительная» доставка), а также вариант доставки, при котором все параметры контроля целостности, необходимые для организации безопасного обмена ответственной информацией, записываются в станционные и бортовые части АЛС-ШР перед началом эксплуатации системы («нулевая доставка»).

Значения параметров $I_{обн}^c$ и $I_{обн}^l$ должны вычисляться с учетом выбранных в СКЦ механизмов защиты от угроз безопасности ответственной информации. Пусть параметры I_{auth}^c и I_{auth}^l определяют количество информации, которое должно быть передано соответственно со стороны станционной и бортовой части АЛС-ШР в рамках прохождения процедуры аутентификации. Тогда при использовании общего радиоканала для станционных и бортовых сообщений выражение $I_{защ2} - I_{auth}^c - I_{auth}^l$ покажет оставшееся количество информации, которое может быть передано по радиоканалу за время прохождения процедуры аутентификации $\left[\frac{T_{свод}}{T_{обн}^c} \right] * T_{обн}^c$. Если данное выражение больше 0, то обновление параметров СКЦ возможно при движении локомотива в зоне действия системы АЛС-ШР путем их передачи по радиоканалу от станционных частей в бортовые или наоборот, что является одним из условий построения процедуры обновления СКЦ [3]. В связи с этим, значение $I_{обн}$ может показывать возможное для передачи по радиоканалу количество информации за время $\left[\frac{T_{свод}}{T_{обн}^c} \right] * T_{обн}^c$, а не $T_{обн}^c$ или $T_{обн}^l$, и, в связи с чем, вычисляться по формуле:

$$I_{обн} = I_{защ2} - I_{auth}^c - I_{auth}^l \quad (1)$$

При использовании разных радиоканалов

для станционных и бортовых сообщений значения $I_{обн}^c$ и $I_{обн}^l$ могут быть вычислены по формулам:

$$I_{обн}^c = I_{защ2}^c - I_{auth}^c, \quad (2)$$

$$I_{обн}^l = I_{защ2}^l - I_{auth}^l \quad (3)$$

Для разработки процедуры обновления параметров СКЦ был предложен следующий алгоритм, схематично показанный на рисунке 1.

1. Вычислить максимальное количество информации $I_{обн}^c$ и $I_{обн}^l$, которое может быть передано соответственно со стороны станционных и бортовых частей за время прохождения процедуры аутентификации с целью обновления параметров СКЦ. При $direction=0$ должен быть вычислен только параметр $I_{обн}^c$ при помощи формулы (2). При $direction=1$ и $M>0$ должно быть также вычислено значение $I_{обн}^l$ с использованием формулы (3). При $direction=1$ и $M=0$ значения $I_{обн}^c$ и $I_{обн}^l$ могут считаться равными ($I_{обн} = I_{обн}^c = I_{обн}^l$) и должны вычисляться с помощью формулы (1).

2. Выбрать вариант обновления параметров СКЦ в станционных частях. Для этого определить возможные варианты обновления параметров СКЦ на основе данных таблицы 1. При возможности построения как удаленной процедуры обновления, так и ручной, должен быть выбран вариант с удаленным обновлением. В результате данного пункта должна быть определена переменная $upd^c \in \{0, 1, 2\}$, где $upd^c=0$ при отсутствии возможных вариантов построения процедуры обновления параметров СКЦ в станционных частях, $upd^c=1$ при выборе ручной процедуры обновления, $upd^c=2$ при выборе удаленной процедуры.

Таблица 1

Условия, определяющие возможность применения удаленной и ручной процедуры обновления параметров безопасности СКЦ в станционных частях АЛС-ШР

Выполнение условия	$sync_man_upd^c=1$	$ext_chc=1 \parallel (ext_ch^n = 1 \& \& I_{обн}^n > 0)$
Да	ручная/удаленная	ручная/удаленная
Нет	удаленная	ручная

3. Выбрать вариант обновления параметров СКЦ в бортовых частях. Для этого определить возможные варианты обновления параметров СКЦ на основе данных таблицы 2. При возможности построения как удаленной процедуры обновления, так и ручной, должен быть выбран вариант с удаленным обновлением. В результате данного пункта должна быть определена переменная $upd^l \in \{0, 1, 2\}$, где $upd^l=0$ при отсутствии возможных вариантов построения процедуры обновления параметров СКЦ в бортовых частях, $upd^l=1$ при выборе ручной процедуры обновле-

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ния, $upd^A=2$ при выборе удаленной процедуры.

Таблица 2

Условия, определяющие возможность применения удаленной и ручной процедуры обновления параметров безопасности СКЦ в бортовых частях АЛС-ШР

Выполнение условия	$sync_man_upd^L = 1$	$ext_ch^L = 1 \parallel (ext_ch^c = 1 \& \& I_{обм}^c > 0)$
Да	ручная/удаленная	$\left[\frac{T_{соед}}{T_{обм}^c} \right] * T_{обм}^c$ ручная/удаленная
Нет	удаленная	ручная

Таблица 3

Условия, определяющие возможность использования «нулевой» и «предварительной» доставки параметров $P_{КЦ}^c$ в бортовые части АЛС-ШР

Выполнение условия	$sync_man_upd^B = 1$	$ext_ch^B = 1$
Да	нулевая/предварительная	нулевая/предварительная
Нет	предварительная	нулевая

4. Определить требуется ли альтернативная доставка параметров $P_{КЦ}^c$ в бортовые части АЛС-ШР. Если доставка не требуется, то присвоить переменной alt^c (см. пункт 5) значение -1 ($alt^c = -1$) и определить необходимость альтернативной доставки параметров $P_{КЦ}^A$ или $P_{КЦ}^B$ (пункт 6).

5. Выбрать вариант альтернативной доставки параметров $P_{КЦ}^c$ в бортовые части АЛС-ШР. Для этого определить возможные варианты на основе данных таблицы 3. При возможности использования обоих вариантов, должна быть выбрана «предварительная доставка». В результате данного пункта должна быть определена переменная $alt^c \in \{0, 1, 2\}$, где $alt^c = 0$, если альтернативная доставка невозможна, $alt^c = 1$ при выборе «нулевой» доставки $P_{КЦ}^c$, $alt^c = 2$ при выборе «предварительной» доставки $P_{КЦ}^c$.

6. Определить требуется ли альтернативная доставка параметров $P_{КЦ}^A$ или $P_{КЦ}^B$ в стационарные и бортовые части АЛС-ШР соответственно. Если доставка не требуется, то присвоить переменной alt^A (см. пункт 7) значение -1 ($alt^A = -1$) и перейти к оценке значений переменных alt^c и alt^A (пункт 8).

7. Выбрать вариант альтернативной доставки параметров $P_{КЦ}^A$ или

$P_{КЦ}^B$ в стационарные или бортовые части АЛС-ШР соответственно. Для этого определить возможные варианты на основе данных таблицы 4. При возможности использования обоих вариантов, должна быть выбрана «предварительная доставка». В результате данного пункта должна быть определена переменная $alt^A \in \{0, 1, 2\}$, где $alt^A = 0$, если альтернативная доставка и невозможна, $alt^A = 1$ при выборе «нулевой» доставки $P_{КЦ}^A$ или $P_{КЦ}^B$, $alt^A = 2$ при выборе «предварительной» доставки $P_{КЦ}^A$ или $P_{КЦ}^B$.

Таблица 4

Условия, определяющие возможность использования «нулевой» и «предварительной» доставки параметров $P_{КЦ}^A$ или $P_{КЦ}^B$ в стационарные и бортовые части АЛС-ШР соответственно

Выполнение условия	$sync_man_upd^c = 1$	$ext_ch^c = 1 \parallel ext_ch^B = 1$
Да	нулевая/предварительная	нулевая/предварительная
Нет	предварительная	нулевая

8. Оценить значения переменных upd^c , upd^A , alt^c и alt^A , полученные в пунктах 2-7. Если одна

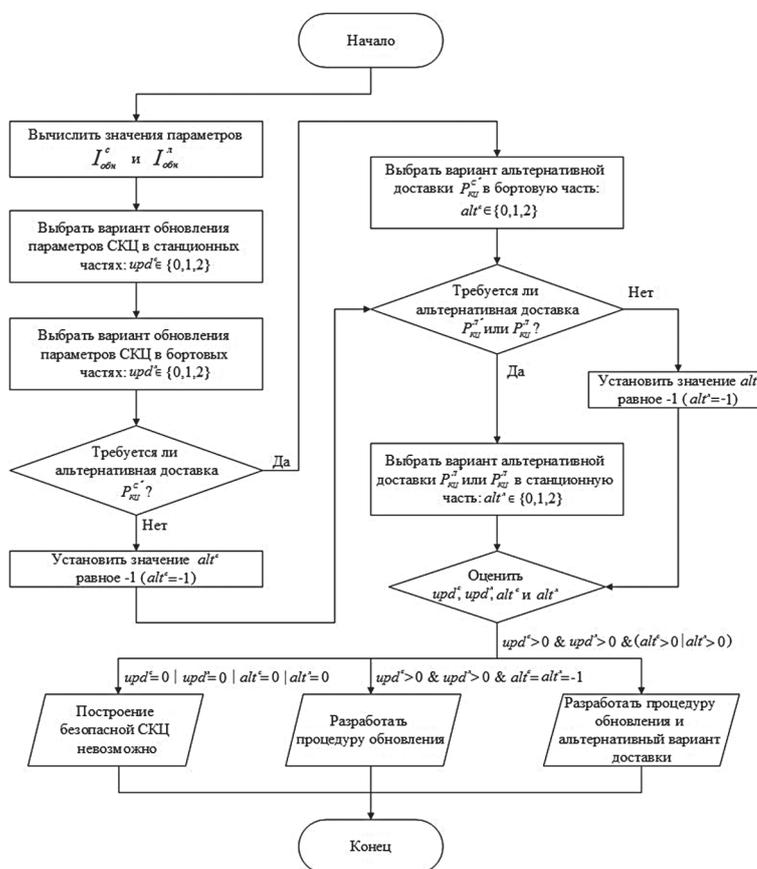


Рис. 1. Алгоритм выбора процедуры обновления параметров СКЦ и альтернативного варианта доставки параметров $P_{КЦ}^c$, $P_{КЦ}^A$ и $P_{КЦ}^B$

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

из переменных равна 0, то построение безопасной СКЦ невозможно, так как отсутствует или безопасный способ обновления параметров СКЦ или вариант альтернативной доставки параметров контроля целостности. При $upd^c > 0$, $upd^a > 0$ и $alt^c = alt^a = -1$ необходимо разработать только процедуру обновления параметров СКЦ, основываясь на выбранных вариантах обновления параметров в станционных и бортовых частях (upd^c , upd^a). При $upd^c > 0$, $upd^a > 0$ и $alt^c > 0$ или $alt^a > 0$ необходимо разработать как процедуру обновления параметров СКЦ, так и альтернативный вариант доставки параметров контроля целостности, основываясь на полученных значениях alt^c и alt^a .

По итогам выбора процедуры обновления параметров СКЦ и альтернативного варианта доставки параметров $P_{КЦ}^c$, $P_{КЦ}^a$ и $P_{КЦ}^l$ должны быть определены следующие параметры:

- вариант обновления параметров СКЦ в станционных частях АЛС-ШР;
- вариант обновления параметров СКЦ в бортовых частях АЛС-ШР;
- вариант альтернативной доставки параметров контроля целостности $P_{КЦ}^c$ в бортовую часть АЛС-ШР;
- вариант альтернативной доставки параметров контроля целостности $P_{КЦ}^a$ и $P_{КЦ}^l$ в станционную или бортовую часть АЛС-ШР соответственно.

Заключение

Описанный в данной статье четвертый этап методики построения СКЦ ответственной информации для систем АЛС-ШР определяет порядок разработки процедуры обновления параметров безопасности СКЦ. Данный этап является заключительным в рамках методики и завершает процесс ее разработки.

Полученная в конечном итоге методика позволяет определить значения параметров по-

строения СКЦ, на основе которых должна производиться разработка архитектуры СКЦ и выбор используемых СЗИ, или сделать вывод о невозможности построения безопасной СКЦ для данной АЛС-ШР. Методика может применяться для железнодорожных участков, оборудованных системами АЛС-ШР, и учитывать их особенности, связанные с порядком эксплуатации, используемым оборудованием, установленными техническими нормами.

В рамках дальнейшей работы представляется целесообразным разработать автоматизированный программный комплекс, реализующий предложенную методику, и провести его тестирование.

Литература

1. Смирнов Д.В., Коротин А.М., Воронов Я.Р. Общие положения методики построения систем контроля целостности ответственной информации в системах АЛС на базе широкополосного радиоканала // Известия Института инженерной физики, 2018. № 4(50). С.67-72.
2. Смирнов Д.В., Коротин А.М., Воронов Я.Р. Определение в рамках методики построения систем контроля целостности ответственной информации в системах АЛС на базе широкополосного радиоканала механизмов защиты от угроз безопасности // Известия Института инженерной физики, 2019. №1 (51). С.74-85.
3. Bezrodnyi, B.F. The Basis for Building Integrity Monitoring System of Critical Information in ALS Based on Broadcast Radio Channel [Текст] / B.F. Bezrodnyi, A.M. Korotin // In CEUR Workshop Proceedings, 2017. Vol-2081 (Selected Papers of the VIII All-Russian Scientific and Technical Conference on Secure Information Technologies, BIT 2017). Pp. 6-10.
4. Шнайер Б. Прикладная криптография. Протоколы, алгоритмы, исходные тексты на языке Си. Триумф, 2002. 816 с.

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И РОБОТОТЕХНИКА

УДК 623

О «НАСТОЯЩЕМ» ИСКУССТВЕННОМ ИНТЕЛЛЕКТЕ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ АРКТИКИ¹

ON THE «REAL» ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR THE DEVELOPMENT OF THE ARCTIC

Игорь Александрович Бугаков
заслуженный изобретатель РФ
почетный работник науки и техники РФ
доктор технических наук, профессор
член Научного Совета 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 Николаевич Царьков
заслуженный деятель науки РФ
доктор технических наук, профессор
Президент Института – Председатель
Правления Института
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210 Московская обл.,
г. Серпухов, Большой
Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967) 35-31-93
E-mail: tsarkov@iifmail.ru

Аннотация

Статья посвящена обоснованию целесообразности применения при освоении Арктической зоны РФ настоящего ИИ, позволяющего создавать эффективные автономные интеллектуальные робототехнические средства и комплексы различного назначения. Большие запасы полезных ископаемых, экстремальные условия, удаленность от крупных мегаполисов, малая плотность населения и проблемы жизнеобеспечения, перспективы прохождения транспортно-коммуникационных магистралей мирового значения – все это делает Арктику естественным полигоном для апробации новых приоритетных технологий, в том числе создания роботизированных поселений, способных стать прообразами подобных структур при освоении других планет, добычи полезных ископаемых на астероидах и пр. Ключевая проблема создания настоящего ИИ – проблема понимания им происходящего, что требует наличия у ИИ достаточной для этого модели мира, языка, способности обучаться и применять знания. Основная операция интеллекта – распознавание, в том числе предвидение как распознавание будущего (глубина предвидения определяет глубину интеллекта). Необходимо объединение междисциплинарных усилий ученых и специалистов в рамках государственной программы.

Ключевые слова: Арктика, интеллект, настоящий интеллект, искусственный интеллект, нейронные сети, понимание, психика, сознание, робот, распознавание, обучение, предвидение, автономность, модель мира, междисциплинарность.

Summary

The article is devoted to the rationale of the use of real AI in the development of the Arctic zone of the Russian Federation, which allows creating effective autonomous intelligent robotic tools and complexes for various purposes. Large mineral reserves, extreme conditions, remoteness from large metropolitan areas, low population density and livelihood problems, prospects for global transport and communication highways — all this makes the Arctic a natural proving ground for testing new priority technologies, including the creation of robotic settlements, able to become prototypes of such structures during the development of other planets, mining of minerals on asteroids, etc. The key problem of creating real AI - the problem of understanding what is happening to them, which requires that the AI has enough for this model of the world, language, ability to learn and apply

¹ По материалам выступления на заседании подгруппы по научным исследованиям рабочей группы «Развитие образования и науки» Госкомиссии по вопросам развития Арктики, состоявшегося в Департаменте государственной научной, научно-технической и инновационной политики Минобрнауки России 31.01.2019 г., Москва.

Кавычки в слове «настоящий» применительно к интеллекту использованы авторами с целью подчеркнуть невозможность создания искусственного интеллекта точно такими же свойствами, какими обладает интеллект естественный любого эволюционного уровня (проблема квалиа). И в то же время будущий «настоящий» искусственный интеллект, который еще предстоит создать и о котором идет речь в статье, по своим возможностям будет значительно превосходить современные достижения претендующих на интеллектуальность искусственных нейронных сетей, являясь, в отличие от них, не узко специализированным, а универсальным интеллектом, проявляющим свойства настоящих, присущих живым организмам, интеллектов.

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И РОБОТОТЕХНИКА

knowledge. The main operation of the intellect is recognition, including foresight as the recognition of the future (the depth of foresight determines the depth of the intellect). It is necessary to unite the interdisciplinary efforts of scientists and specialists in the framework of the state program.

Keywords: Arctic, intelligence, real intelligence, artificial intelligence, neural networks, understanding, psyche, consciousness, robot, recognition, learning, foresight, autonomy, model of the world, interdisciplinarity.

Важнейшей объектом приложения инновационных технологий, в том числе технологий искусственного интеллекта, является Арктическая зона Российской Федерации (АЗРФ). Перспективы развития АЗРФ определены рядом документов [1-3]. Важнейшей стратегической задачей является превращение АЗРФ в основную ресурсную базу России² с сохранением мирного сотрудничества с имеющими прямое отношение к Арктике странами. Прогнозируется, что в результате глобальных климатических изменений в перспективе на главенствующие позиции в структуре всемирной торговли могут выйти товаропотоки, проходящие через высокоширотные транспортно-коммуникационные магистраль Арктики. Начинается полномасштабное освоение минеральных и энергетических ресурсов богатейшего арктического континентального шельфа, что обусловлено истощением запасов полезных ископаемых континентальной части Земли и прямо влияет на структуру мирового энергообеспечения [4].

В принятой в феврале 2013 года «Стратегии развития АЗРФ и обеспечения национальной безопасности» в качестве осложняющих освоение Арктики факторов выделено [3]:

- экстремальность природно-климатических условий Арктики;
- очаговый характер промышленно-хозяйственного освоения территорий;
- низкая плотность населения, удаленность их поселений от основных промышленных центров;
- зависимость хозяйственной деятельности и жизнеобеспечения населения от поставок в АЗРФ топлива, продовольствия, товаров первой необходимости;
- низкая устойчивость экологических систем, определяющих биологическое равновесие и климат Земли, их зависимость даже от незначительных антропогенных воздействий;
- отрицательные демографические процессы в большинстве приарктических субъектов РФ, отток трудовых ресурсов (особенно высококвалифицированных) в южные районы России и за границу;
- критическое состояние объектов жилищно-коммунального хозяйства, недостаточная обе-

спеченность населения чистой питьевой водой;

- отсутствие эффективной системы подготовки кадров, дисбаланс между спросом и предложением трудовых ресурсов в территориальном и профессиональном отношении (дефицит кадров рабочих и инженерных профессий и переизбыток невостребованных специалистов, а также людей, не имеющих профессионального образования);

- низкое качество жизни коренных малочисленных народов, проживающих на территории АЗРФ;

- отсутствие отечественных современных средств и технологий для поиска, разведки и освоения морских месторождений углеводородов в арктических условиях;

- износ основных фондов, в особенности транспортной, промышленной и энергетической инфраструктуры;

- неразвитость базовой транспортной инфраструктуры, ее морской и континентальной составляющих, старение ледокольного флота, отсутствие средств малой авиации;

- высокая энергоемкость и низкая эффективность добычи природных ресурсов, издержки северного производства при отсутствии эффективных компенсационных механизмов, низкая производительность труда;

- дисбаланс в экономическом развитии между отдельными приарктическими территориями и регионами, значительный разрыв между лидирующими и депрессивными районами по уровню развития;

- недостаточное развитие навигационно-гидрографического и гидрометеорологического обеспечения мореплавания;

- отсутствие средств постоянного комплексного космического мониторинга арктических территорий и акваторий, зависимость от иностранных средств и источников информационного обеспечения всех видов деятельности в Арктике (включая взаимодействие с воздушными и морскими судами);

- отсутствие современной информационно-телекоммуникационной инфраструктуры, позволяющей осуществлять оказание услуг связи

² Так, например, считается, что в АЗРФ сосредоточено примерно 100 млрд. тонн условного топлива (80% – газ, 20% – нефть) [5]. АЗРФ обеспечивает около 25% национального экспорта. В АЗРФ беспрецедентно высока доля добавленная стоимость добывающих предприятий – 60% [4].

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И РОБОТОТЕХНИКА

населению и хозяйствующим субъектам на всей территории АЗРФ;

- неразвитость энергетической системы, а также нерациональная структура генерирующих мощностей, высокая себестоимость генерации и транспортировки электроэнергии;

- дефицит технических средств и технологических возможностей по изучению, освоению и использованию арктических пространств и ресурсов;

- возрастание техногенной и антропогенной нагрузки на окружающую среду с увеличением вероятности достижения ее предельных значений в некоторых прилегающих к Российской Федерации акваториях Северного Ледовитого океана, а также на отдельных территориях АЗРФ, характеризующихся наличием особо неблагоприятных зон, потенциальных источников радиоактивного загрязнения, высоким уровнем накопленного экологического ущерба.

В целом в «Стратегии развития АЗРФ...» на момент ее утверждения (2013 год) констатировалась недостаточная готовность АЗРФ к переходу на инновационный путь развития. Это и явилось, по-видимому, основной причиной того, что не все из запланированного по улучшению качества жизни в АЗРФ, обеспечению безопасности (в широком смысле), транспортной доступности и мобильности реализуется полностью и вовремя.

Высокая стоимость жизни (во всех смыслах) человека в условиях Арктики делает целесообразным рассмотрение вопроса об освоении АЗРФ как стратегической ресурсной базы страны, используя робототехнические средства и комплексы при минимальном непосредственном участии (вплоть до полного отсутствия) людей на местах³. За человеком остается функция дистанционного контроля за автоматическими процессами и действиями роботов с возможностью в отдельных случаях брать управление на себя.

Несмотря на всю кажущуюся сложность такого безлюдного освоения, реализация таких подходов на практике во многих отраслях – дело ближайшего будущего. Тенденции мирового развития робототехники и искусственного интеллекта таковы, что безлюдность производства становится нормой уже сегодняшнего дня и тем более дня завтрашнего. Потому основной упор при освое-

нии АЗРФ и обеспечении национальной безопасности необходимо сделать на максимальной автоматизации, автономности применяемой для этой техники с использованием технологий искусственного интеллекта (ИИ).

Автономность касается почти всех составляющих: добычи и транспортировки природных ископаемых и водных биологических ресурсов (в том числе в покрытых льдом районах), их первичной переработки, различных видов обеспечения, мониторинга и прогнозирования состояния природной среды, защиты территории и объектов от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера и устранение их последствий, проведения разведочных работ, спасательных и специальных операций, охраны и обороны. Желательна максимальная автоматизация процесса требуемой инфраструктуры.

Об искусственном интеллекте сегодня говорят многие, ибо ИИ – главный вектор развития науки и технологий ближайшего и просматриваемого отдаленного будущего, причина и содержание уже частично начавшейся очередной научно-технической революции – *революции интеллектуализации искусственных систем*⁴. Так что целесообразность использования ИИ при освоении Арктики кажется почти очевидной. Но, к сожалению, желаемая автономность техники не может быть создана на основе того, что сегодня есть в области достижений ИИ (точнее – в области, которую относят к ИИ).

Для освоения Арктики нужен «настоящий» ИИ. Арктика – наиболее подходящая территория для апробации возможностей автономных систем (прежде всего – робототехнических) различного назначения с «настоящим» ИИ, имеющим свою «субъективную» модель мира, специальный «язык» с набором необходимых иерархически вложенных понятий (категорий), базу знаний и пр., способным воспринимать, проводя категоризацию, и, как следствие, понимать (выявлять смыслы, встраивая воспринятое в свою модель мира), обучаться (в том числе само-), развиваться⁵. По сути, речь идет о наличии «психики» того или иного «видового» уровня развития. То, что есть сегодня в области ИИ, – важно, но это всего лишь элементы (сопоставимые с отдельными рефлексами и автоматизмами живых организмов) ИИ, но не ИИ в целом. Тот, кто первый создаст «настоящий» ИИ, и станет тем самым «вла-

³ Очевидно, что роботизация целесообразна там, где, во-первых, человек не может делать то, что может робот: экстремальные, опасные условия, ограниченные возможности тела человека (малы или велики размеры, ограниченность возможных движений, отсутствие нужных навыков, усталость,...) и, во-вторых, робот эффективнее человека: способен выполнить работу более качественно (точнее и быстрее), меньше тратить ресурсов на ее выполнение, т.е. стоимость выполнения работы (с учетом заработной платы человеку) роботом меньше.

⁴ Порох, паровоз, атомная энергия, компьютер, искусственный интеллект, ...? Порох, паровоз, атомная энергия, компьютер, искусственный интеллект, ...?

⁵ Тому способствует и принятый кластерный (точечный, узловой) подход к развитию АЗРФ.

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И РОБОТОТЕХНИКА

стеллином мира», определяющим вектор дальнейшего развития человечества.

Потому важнейшей задачей взаимодействия всех заинтересованных в освоении АЗРФ сторон⁶ является сосредоточение усилий ученых и специалистов на разработке на основе междисциплинарного подхода методологии и технологий создания, применения и совершенствования автономных интеллектуальных средств и систем различного «эволюционного» уровня развития, способных *понимать* (прежде всего, в области их «профессиональной» деятельности) и на этой основе в процессе *деятельности* развиваться, приобретать и совершенствовать новые навыки, взаимодействовать с человеком, другими носителями искусственного интеллекта своего и иерархически соседних «видов», не допуская аварийных ситуаций и катастрофического развития событий. Дистанционное управление должно, конечно же, остаться, но в минимально достаточном объеме⁷. При автономном поведении решение может быть принято быстрее («на месте виднее»), что крайне важно в критических ситуациях.

На основе «понимающих» развивающихся роботов возможно создание роботизированных «поселений» будущего⁸, которые могут стать прообразом для подобных поселений при освоении других планет, добычи полезных ископаемых на астероидах и пр. Формирование и апробация таких «поселений» в условиях Арктики (малая плотность населения, отдаленность крупных городов) не только выгоднее, но и безопаснее⁹.

Что есть сегодня в области разработки ИИ?

Если кратко, то:

- деление ученых по их принадлежности к «старой» и «новой» научным школам на сторонников символического формализма и приверженцев идеи нейронной самоорганизации, самообучения, пока слабо взаимодействующим и потому с трудом понимающим друг друга, хотя объединение классического и нейросетевого подхода представляется единственным способом даль-

нейшего развития ИИ;

- попытки (порой весьма успешные) имитации с помощью искусственных нейронных сетей (ИНС) отдельных функций распознавания (лиц, состояний, болезней,...) как следствия способности ИНС обрабатывать большие объемы данных, проводить кластеризацию и классификацию, находить неявные закономерности;

- частные попытки разрозненных групп и индивидуальных ученых, не обладающих достаточно полной информацией ни об интеллекте естественном, ни о возможностях современной науки, ни о достижениях других ученых, создать что-то свое, чаще всего «эволюционно» обреченное на «вымирание».

Чего нет в области разработки ИИ по «образу и подобию» живого:

- нет понимания не только того, что есть психический код, память, квалиа, сознание, как формируется субъективная реальность, но и общего, единого понимания даже того, что такое интеллект и каковы его основные функции. Диапазон определений интеллекта простирается от «общей способности мыслить» до «способности решать интеллектуальные задачи», к которым относятся задачи, для которых еще нет алгоритмов¹⁰. Очевидно, что при такой трактовке естественного интеллекта ожидать от большинства определений интеллекта искусственного чего-то большего, чем отнесение ИИ к «области информатики, занимающейся разработкой интеллектуальных компьютерных систем, то есть систем, обладающих возможностями, которые мы традиционно связываем с человеческим разумом, – понимание языка, обучение, способность рассуждать, решать проблемы и т. д.»¹¹, или рассмотрения ИИ в качестве научной дисциплины, занимающейся «моделированием разумного поведения» [6] вряд ли стоит;

- при разработке технических систем с ИИ нет учета целостности живых организмов, целесообразности совместной, дающей сверхад-

⁶ В том числе и межведомственного (например, в рамках комплексной целевой программы «Арктические технологии»).

⁷ Учитывая, что в арктических условиях на специальные пункты управления, помехозащищенные каналы связи, обучение, жизнеобеспечение, оплату труда персонала приходится до 80% всех расходов при добыче ресурсов.

⁸ В частности, например, робо-интернатов, где в среде себе подобных представители разных «эволюционных робо-видов» под руководством человека и его помощников из числа «роботов-наставников» осваивали бы (в том числе и ускоренно!) общие образовательные и специальные профессиональные программы. Такое ускоренное сочетание видового и индивидуального развития в среде существования и функционирования позволяет за короткое время создавать («выводить») нужные виды и «воспитывать» обладающих желаемыми качествами носителей ИИ различного функционального назначения.

⁹ К сожалению, опасность ИИ, как нам представляется, несколько не преувеличена и не стоит упрекать в алармизме И.Маска, С.Хокинга, Д.Баррата и др. Задача человечества – не допустить неконтролируемого самосовершенствования ИИ, имеющего «дурные наклонности».

¹⁰ Что правильно как результат (многим известно «определение» интеллекта как «сверхалгоритма по порождению алгоритмов»), но, к сожалению, не раскрывает сущности интеллекта. Заметим, что алгоритмический подход подчеркивает субъективность интеллектуальности решаемых задач: то, что для одного является задачей интеллектуальной, для другого (кому алгоритм решения задачи известен) таковой не является.

¹¹ Данное определение часто считают классическим, связывая его с Барром и Файгенбаумом [5].

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И РОБОТОТЕХНИКА

дитивный эффект, обработки информации от различных сенсорных систем (зрение, слух, обоняние, осязание,...), широкого применения идей и следствий присущего природе принципа минимальности (ассоциативность, динамическое восприятие, полярность, градиентность, базисность, фрактальность, робастность, подражание, предвидение, диапазонность существования и пороговость взаимодействия, рефлекс и автоматизмы, ...), генетического соответствия формы тела и функций органов организма среде его существования;

- нет эффективных попыток решения *проблемы понимания*, учета главной роли понимания в построении иерархических субъективных моделей мира, системообразующей роли *предвидения* как разновидности распознавания («распознавания будущего») в организации и реализации поведения;

- нет учета роли прямых и обратных информационно-управляющих связей в иерархически-сетевых структурах коры мозга;

- нет понятных механизмов построения «нового из старого»¹², целого из базисных элементов;

- нет приемлемой *законодательной базы*, определяющей возможности для разработки и широкого применения робототехники и искусственного интеллекта;

- нет требуемого анализа последствий развития и применения ИИ, рисков его саморазвития, механизмов обеспечения безусловной *дружественности ИИ*;

- нет обоснованных механизмов реализации поведения (в том числе группового),...

Все это должно быть под пристальным вниманием современной междисциплинарной науки, учитывая, к тому же, наряду с достижениями характерные недостатки и ограничения современных ИНС так называемого глубокого обучения:

- ИНС способны на грубые ошибки;

- ИНС легко обмануть;
- выводы и решения ИНС непрозрачны (необъяснимы для человека);

- для обучения ИНС требуются огромные массивы исходных данных¹³;

- ИНС не способна переучиться с сохранением уже сформированной способности распознавать образы, на которые она была настроена при первичном обучении.

Как следствие – *невозможность применения современных ИНС в ответственных случаях, в которых велика цена ошибочного решения*¹⁴!

Основная причина наличия этих недостатков и одновременно проблема всех современных попыток имитации функции распознавания посредством ИНС – отсутствие у них такого качества как *понимание*¹⁵. Современные ИНС многое могут как человек и даже лучше и потому, конечно, они и реализуемые в них алгоритмы имеют отношение к интеллекту, но не тождественны ему. Они есть инструмент интеллекта и в иерархии объектов и процессов, создающих интеллект, стоят достаточно далеко от вершины. «Геометрические преобразователи», «локальное обобщение», «подгонка кривых под данные» – так примерно характеризуют специалисты суть современных ИНС [7]. Такое определение не уменьшает достижений глубокого обучения. Но и свидетельствует о том, что до «настоящего» ИИ еще далеко. Любое распознавание в живом основано на понимании, причем одновременно на различных иерархических уровнях. Успехи ИНС важны и будут далее использоваться для интеллектуализации техники. Но современные искусственные «интеллектуальные» системы *не понимают*. В качестве примера такого непонимания обычно приводят «китайскую комнату» Дж. Сирла¹⁶ [8].

В качестве некоторых важных задач нашего развития для развития ИНС можно определить:

- понимание «физики» процессов самоор-

¹² Проблема не решена со времен клинамена Лукреция Кара.

¹³ В то же время ребенок способен за несколько примеров запомнить конкретного человека и впоследствии узнавать его в любых ракурсах и положениях. В чем причина? Очевидно, в том, что естественный интеллект работает все же несколько иначе, чем ИНС: в запоминании и распознавании участвует весь предыдущий опыт взаимодействия носителя интеллекта с внешним миром, причем при обязательном (и это главное!) понимании воспринимаемого (см. далее). Это, дополняя параллельность обработки информации, дает возможность живым организмам при малой тактовой частоте мозгового «процессора» распознавать гораздо быстрее любого компьютера.

¹⁴ Вспомним ситуацию 26.09.1983 года, когда подполковник Петров С.Е., будучи оперативным дежурным на командном пункте (Серпухов-15) предотвратил потенциальную ядерную войну после ложного срабатывания системы предупреждения о ракетном нападении со стороны США (см., например, https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B5%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B2_%D0%A1%D1%82%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B0%D0%B2_%D0%95%D0%B2%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%87). Смог бы это сделать ИИ?

¹⁵ «Понимание – способность проникнуть в смысл, состояние сознания, которому ясен смысл чего-нибудь» (Толк. словарь Ушакова). Синонимы: постигание (постижение), осмысление, уразумение, усвоение, уяснение, ...

Нужно ли сознание для понимания? Сложный вопрос. Вполне возможно, что нет. Мозг, у которого есть «я» с моим сознанием, понимает (т.е. логически встраивает воспринятое в его модель мира) больше, чем я понимаю (осознаю) и именно результат своей неведомой для моего сознания работы он (мозг) предоставляет моему сознанию в виде понятных (уже «мне») результатов его выводов как моих «раздумий» (иногда в виде тех или иных «озарений»).

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И РОБОТОТЕХНИКА

ганизации нейросетей и принятия ими «решений»;

- приобретение умения строить из имеющихся нейронов независимые нейронные структуры, а не пытаться научить одну и ту же нейросеть распознавать разные объекты (вероятнее всего, это невозможно)¹⁷;

- понимание процесса формирования и использования инвариантных признаков, ключевых стимулов для уменьшения размера обучающего множества и количество ошибок;

- использование не только ассоциативности в пространстве и времени (условные рефлексy), но и каузальности (причинность), умение разделять ассоциативность от истинной причинности («ритуальное поведение» голубей Скиннера) чтобы исключить нахождение закономерностей там, где их нет¹⁸. Необходимо учитывать, что способность найти причинность в следующих друг за другом событиях невозможна без понимания. Даже неосознанное понимание – это понимание мозгом происходящего. Оно формируется автоматически, если все идет «как обычно». И только при нарушении этой «обычности» мозг дает команду сознанию разобраться с тем, что происходит;

- понимание оптимальности соотношения между видовым и индивидуальным опытом.

Уточним некоторые основные понятия [9...11].

Интеллект – интегральное проявление целостной психики, ее сверхаддитивное свойство, метапрограмма, обеспечивающая выживание и развитие ее носителя, свойство способного к автономному поведению в реальной или виртуальной средах объекта с учетом генетического и индивидуального опыта *достоверно предвидеть будущее* и на этой основе планировать и реализовывать свое целенаправленное поведение с созданием новых стратегий и алгоритмов (программ). «Настоящий» ИИ любого уровня «эволюцион-

ной» сложности невозможен без придания ему в необходимом объеме того, что в живом именуют *психикой* и через понимание связывают со способностью ощущать, распознавать, понимать, воспринимать, запоминать, представлять, предвидеть, воображать и т.д. Ключевая функция интеллекта – распознавание. Распознавание во имя и на основе предвидения (предвидение – «распознавание будущего»).

Психика организма – система управления его развитием и поведением. Реализуется посредством множества генетически заданных и последовательно раскрываемых неизменных и индивидуально настраиваемых программ. Проявляется как специфическая (для каждого эволюционного уровня живого) совокупность: *процессов* (для человека это ощущения разных модальностей, внимание, восприятие, осознание, запоминание, вспоминание, представление, воображение, предвидение, планирование, речь, движение), *состояний* (для человека – сосредоточенность, напряженность, стресс,...) и *свойств* (для человека – темперамент, характер, целеустремленность, жизненная позиция: (потребности, интересы, убеждения, идеалы), способность к эмпатии, сопереживанию). Многие состояния порождаются эмоциями и (или) являются ими, неся коммуникативную функцию. Базисные процессы, состояния, свойства определяется эволюционным уровнем и «целевой функцией» вида¹⁹.

Сознание – системное, эмерджентное свойство, появляющееся при достижении организмом определенной сложности, обеспечивающее активную роль организма в процессе жизнедеятельности. Проявляется через наличие самосознания (самоосознания), свободы воли, переживаний (эмоций и чувств), рефлексии, интроспекции, эмпатии, речи. Это специальный механизм обеспечения успевающего сложного организма в сложном мире за счет большей глубины предвидения, способности «сделать заранее».

¹⁶ Однако, заметим, что непонимание китайского языка не отвергает понимание человеком внутри комнаты в целом ситуации (человек внутри понимает, что он должен давать правильные ответы на запросы извне). Точно так же спрашивающему вне комнаты важен также конечный результат – получение правильных ответов и он (спрашивающий) понимает, что находящийся внутри дает правильные ответы на его вопросы. Так что, на уровне наблюдающего за этим «диалогом» «взаимопонимание» спрашивающего и отвечающего есть. Его, конечно, нет на уровне понимания отвечающим смыслов задаваемых вопросов и его «правильных» ответов на них. Но это другой уровень анализа. «Китайское» непонимание допустимо и является нормой нашей современной жизни. Мы не понимаем как работает та или иная техника, но успешно ей пользуемся, так что наблюдатель за нашими действиями не может сказать ничего о степени нашего понимания протекающих внутри этой техники процессов. Более того, наше непонимание не влияет на качество работы этой техники. Т.е. необходимо вводить уровни понимания, ибо их всегда несколько. Применительно к ИИС критичность непонимания в том, что оно распространяется на восприятие – то, где это понимание обязательно.

¹⁷ Нейроны одной нейросети могут частично использоваться (в том числе одновременно) в качестве нейронов другой сети, но, конечно, при наличии необходимой гальванической развязки, реализация которой в живых системах осуществляется, в частности, с использованием различных химических веществ.

¹⁸ Животные работают на ассоциациях, связывая одно с другим, не понимая причины и не ища ее. Человек, познавая мир, постепенно расширяет пространство каузальности.

¹⁹ К сожалению, в психологии пока нет целостного взгляда на единую природу психического (даже на уровне словаря, не говоря уже о структурах: общей и частных. Деление состояний на эмоциональные, познавательные, волевые – слабо, ибо реальность – всегда есть их весовое объединение. Проблема базисов!

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И РОБОТОТЕХНИКА

В биологическом смысле - инструмент интеллекта, позволяющий организму осуществлять целесообразное поведение в новых условиях (или в старых условиях, но с новыми целями) с формированием новых рефлексов и автоматизмов поведения, пополняющих индивидуальный опыт (т.н. «подсознание», куда сознанию обычно нет доступа), повышающих оперативность поведения и выживаемость. Многие когнитивные процессы идут на бессознательном уровне (в том числе – категорирование). Как очередной и наиболее важный контур управления разрешает проблему нарастающей сложности живого в процессе его эволюции.

Робот – искусственный объект, реализующий в реальной или виртуальной среде целенаправленное рациональное поведение без непосредственного контакта с человеком²⁰.

Что необходимо сделать в первую очередь. Прежде всего, в качестве отдельного *государственного* проекта (программы) в рамках освоения Арктики необходимо сформировать междисциплинарный проект по разработке *автономных роботов с искусственной психикой* для условий Арктики, объединив в его рамках усилия *отдельных* ученых и научных коллективов, создав (на базе одной организации) *полноценный междисциплинарный временный трудовой коллектив с дистанционным взаимодействием*²¹, способный к *революционному* прорыву в области создания искусственного интеллекта на основе понимания процессов в живых организмах с учетом роли генетического и индивидуального опыта²². В этом коллективе должны быть объединены представители «старой» (классической) и «новой» (нейросетевой) школ, представители всех основных составляющих ЕИ и ИИ (нейрофизиологи, математики, лингвисты, программисты, этологи,...). Достичь такого прорыва за счет «самоорганизации» ученых, уповая на «рынок», коммерческую привлекательность соз-

даваемого продукта, практически невозможно. Нужны средства и государственная воля. Такой прорыв – дело государственного уровня, сравнимый с прорывом при создании ядерного и термоядерного оружия. Возможно, потребуется создание нескольких таких коллективов в рамках одной системы, решающих частные проблемы и задачи.

Надо сосредоточиться на исследовании и искусственном воспроизводстве основных составляющих интеллектуального поведения (по отдельности и в комплексе):

- обоснование и генетическое закрепление базисных видовых и индивидуальных программ развития искусственного организма (под желаемые функции в конкретной среде обитания)²³;
- получение, первичная обработка и интеграция сенсорных сигналов различных модальностей с учетом восходящих и нисходящих путей, видового предназначения;
- определение языка взаимодействия и «мышления», его филогенетических и возможных онтогенетических категорий²⁴;
- способность к абстрагированию, построению иерархической, причинно-связанной модели мира, оперированию иерархическими понятиями;
- познание окружающего мира, способность к обобщению и созданию нового;
- хранение информации с возможностью ее ассоциативного запоминания и вспоминания (во времени и пространстве), объединения и разделения;
- формирование рефлексов и автоматизмов поведения с все меньшим контролем со стороны «сознания» по мере накопления опыта;
- реализация терминального управления при совершении движений;
- способы принятия решений и алгоритмизации поведения;
- ...

²⁰ Такое определение допускает существование как автономных, так и дистанционно управляемых роботов.

²¹ Нужен «полновесный» коллектив, включающий представителей всех требуемых научных направлений, причем «базис» функционального пространства разработки ИИ должен быть полным! Пока серьезных попыток создания такого коллектива, понимающего чего он хочет и способного это достичь, насколько нам известно, не было.

²² Надо отказаться от упования на «эволюционный» путь создания «настоящего» ИИ. На это нет времени. Да и возможностей у каждого частного коллектива ученых той или иной организации, даже уже объединенных в рамках тех или иных государственных структур, сегодня явно недостаточно.

²³ Следуя робастности филогенетических программ с их индивидуальной подстройкой в онтогенезе.

²⁴ Условие осуществления категоризации - диапазонность существования и пороговость взаимодействия (трансформации, перехода в новое «фазовое» состояние) природных объектов. Все природное существует в том или ином диапазоне условий, выход за который ведет к его пороговому переходу в другое «фазовое» состояние. Эти общие свойства диапазонности существования и пороговости трансформации всех природных объектов позволяют высокоорганизованному живому для восприятия окружающего мира вводить категории как классы понятий, сводя «бесконечное» количество проявлений «вещей в себе» к несколько упрощенному, но достаточно для практического применения конечному количеству классов их описания, что имеет следствием эффективную реализацию распознавания, мышление, способность описания, коммуникацию и пр.[11].

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И РОБОТОТЕХНИКА

Литература

1. Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу: утв. Президентом РФ 18.09.2008 №Пр-1969.
2. Государственная программа «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации»: утв. Правительством РФ 21.04.2014 №336, новая редакция – от 31.08.2017 №1064.
3. Стратегия развития арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года: утв. Президентом РФ 20.02.2013.
4. Шнайдер А.Г. Стратегия развития арктической зоны Российской Федерации и обеспечение национальной безопасности в системе стратегического планирования // Современные производительные силы, 2015. №3, С.19-30. http://federalbook.ru/files/SEVER/RS_2/RS2-2015-SHnajder.pdf
5. Feigenbaum Edward A., Barr Avron. The Handbook of artificial intelligence Vol. 1. - Addison-Wesley, 1986.
6. Аналитический обзор «Применение систем искусственного интеллекта в условиях нового этапа освоения Арктики» Координационного Совета по развитию северных территорий и Арктики РСПП и СПП Заполярья. М., 2018 (http://robotunion.ru/files/NAUR-AI_RU_Arctic.pdf).
7. Алпайдин Э. Машинное обучение: новый искусственный интеллект / Пер.с англ. М.: Издательская группа «Точка», 2017. 208 с.
8. Сирл Дж.Р.. Разум, мозг и программы. В кн. Хофштадтера Д.Р. и Деннетта Д.К. Глаз разума. Самара: Бахрах-М, 2009.
9. Бугаков И.А., Царьков А.Н. Интеллектуализация военной робототехники: терминологическая и технологическая проблемы // Известия Института инженерной физики, 2017. № 3(45). С.87-93.
10. Бугаков И.А. О нервной системе и психике роботов // Сборник трудов участников VIII Всероссийской научно-практической конференции «Современное непрерывное образование и инновационное развитие» // Под редакцией проф. А.Н. Царькова и проф. И.А. Бугакова. Серпухов: МОУ «ИИФ», 2018. Т.1. С. 158-171.
11. Бугаков А.И., Бугаков И.А. Категоризация как основа восприятия в системах естественного и искусственного интеллекта // Сборник трудов участников VIII Всероссийской научно-практической конференции «Современное непрерывное образование и инновационное развитие» // Под редакцией проф. А.Н. Царькова и проф. И.А. Бугакова. – Серпухов: МОУ «ИИФ», 2018. Т.1. С. 150-157.



УДК 001

КАК ПОВЫСИТЬ ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПЕРЕЧНЯ РЕЦЕНЗИРУЕМЫХ ИЗДАНИЙ

HOW TO IMPROVE THE QUALITY CONTROL OF THE LIST OF PEER- REVIEWED PUBLICATIONS

Николай Михайлович Емелин
*заслуженный деятель науки
и техники РСФСР*
доктор технических наук, профессор
главный научный сотрудник
ФГБНУ «Госметодцентр»
Адрес: 117997, Москва,
ул. Люсиновская, д. 51
Тел.: +7 (499) 706-81-24

Аннотация

Рассмотрены динамика изменения нового Перечня рецензируемых изданий, его качественная и количественная оценка. Предлагаются подходы к осуществлению контроля качества Перечня

Ключевые слова: рецензируемые научные издания, перечень, научные специальности, диссертационные советы, оценка, рейтингование.

Summary

The dynamics of changes in the new List of peer-reviewed publications, its qualitative and quantitative assessment are considered. Approaches to implementation of quality control of the List are proposed.

Keywords: peer-reviewed scientific publications, list, scientific specialties, dissertation councils, assessment, rating.

С момента опубликования статьи «Качественный прорыв в формировании Перечня рецензируемых изданий» [2] прошло почти три месяца. Перечень рецензируемых изданий (далее Перечень) увеличился на 104 издания и вырос до 2036 изданий. Собственно, были доработаны заявки на включение в Перечень, поданные еще в 2018 году и уже 2019 году.

Произошли ли существенные изменения в Перечне? Нет. Распределение изданий по специальностям практически не изменилось. Зададимся вопросом: будет ли и дальше расти количество изданий в Перечне? Будет. В среднем, ежемесячно поступает 10-15 заявок от изданий. И пока процесс формирования Перечня, в основном, носит односторонний характер, только на увеличение.

Для того, чтобы сделать процесс двухсторонним, необходимо оценивать издание не только при подаче заявки, но и осуществлять периодический контроль за качеством публикуемых статей, за динамикой развития научного издания и по результатам контроля делать вывод: достойно или не достойно научное издание быть в Перечне.

Определенный опыт экспертизы содержания научных статей и качественного состава редакционных коллегий (советов) имеется [1]. Но для повышения эффективности экспертизы нужно шире использовать такие, к примеру, наукометрические показатели как:

- доля статей в издании по специальностям, по которым данное издание включено в Перечень;
- объем рекламной и другой не научной информации в научном издании;
- доля авторов из организаций, которые являются учредителями изданий;
- индекс Хирша издания;
- импакт-фактор РИНЦ (двухлетний или пятилетний);
- и целый ряд других.

Используя результаты экспертизы, представляется целесообразным провести рейтингование изданий по каждой научной специальности и уже далее делать вывод: достойно или не достойно научное издание быть в Перечне по отдельной научной специальности или в целом. Саму процедуру рейтингования можно представить как:

1. Выделение кластеров научных изданий по научным специальностям.

2. Обоснование критериев и показателей оценки качества изданий.

3. Разработка методического обеспечения проведения процедур рейтингования.

4. Организация и осуществление сбора информации, необходимой для проведения рейтингования.

5. Проведение рейтинговой оценки изданий в кластерах изданий по научным специальностям.

6. Обоснование пороговых значений в кластерах для принятия решения о целесообразности оставления изданий в Перечне.

И еще на что хотелось бы обратить внимание. По нашему мнению, вполне логично привязать деятельность научных изданий к деятельности диссертационных советов, а именно, к решениям Высшей аттестационной комиссии об отмене решений диссертационных советов о присуждении ученых степеней и выдаче соответствующих дипломов по несоответствию требованиям, предъявляемым к диссертациям (пункт 9 Положения о присуждении ученых степеней).

Анализ 18-ти решений за 2018 год и 4-х решений за 2019 год об отмене решений диссертационных советов о присуждении ученых степеней по п.9 Положения о присуждении ученых степеней показывает, что в 129 журналах, входящих в Перечень, были опубликованы основные научные результаты диссертаций, по которым ВАК принял решение об отмене. При этом в пяти журналах были опубликованы основные научные результаты двух диссертаций, по которым ВАК принял решение об отмене (по медицинским, биологическим, педагогическим, филологическим, социологическим и политическим наукам), а в одном – трех (все по педагогическим наукам). Конечно, надо проанализировать, какие научные результаты были опубликованы в этих журналах, они ли именно играют существенную

роль в новизне полученных в диссертациях научных результатов, и тогда уже делать какие либо выводы (поэтому считаем преждевременным называть эти журналы). Но есть над чем задуматься всем редакционным советам (коллегиям).

Ряд предложений по повышению качества Перечня рецензируемых научных изданий изложены в работах [1-6]. Поднятые в них вопросы, по нашему мнению, актуальны и требуют дальнейшего обсуждения, к чему приглашаются читатели журнала.

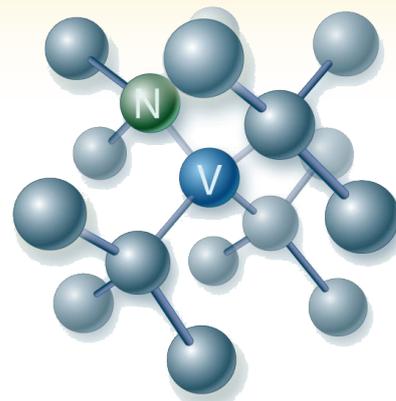
Литература

1. Емелин Н.М. Оптимизация Перечня рецензируемых научных изданий // В сборнике: Современное непрерывное образование и инновационное развитие. Сборник трудов участников VIII Всероссийской научно-практической конференции, 2018. С.98-99.
2. Емелин Н.М. Качественный прорыв в формировании Перечня рецензируемых изданий // Известия Института инженерной физики, 2019. №1(51). С.102-103.
3. Емелин Н.М., Карулин В.П. Обобщенная оценка соответствия научных изданий требованиям, предъявляемым к рецензируемым научным изданиям // Известия Института инженерной физики, 2018. №3(49). С.97-100.
4. Емелин Н.М. Перечень рецензируемых научных изданий: достоинства и недостатки // В сборнике: Современное непрерывное образование и инновационное развитие. Сборник трудов участников VII Всероссийской научно-практической конференции, 2017. С.183-186.
5. Емелин Н.М., Карулин В.П., Тараброва И.Н. Алгоритм оценивания рецензируемых печатных изданий // Сборник научных трудов Института инженерной физики. Серпухов, 2017. С.75-79.
6. Емелин Н.М. Информационное обеспечение мониторинга рецензируемых научных изданий // Известия Института инженерной физики, 2016. №1(39). С.75-78.

УДК 539.182

О МНОГОКУБИТНЫХ СХЕМАХ ЗАПУТЫВАНИЯ И ТЕЛЕПОРТАЦИИ НА ОСНОВЕ NV-ЦЕНТРОВ В АЛМАЗЕ

ON THE MULTI-QUBIT ENTANGLEMENT SCHEMES AND TELEPORTATION BASED ON NV- CENTERS IN A DIAMOND



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*

Александр Альбертович Масликов
*кандидат физико-математических наук,
доцент*

*заведующий комплексной
лабораторией физики
Филиал «Протвино»
Государственного университета «Дубна»
Адрес: 142281, Московская обл.,
г. Протвино, Северный проезд, д. 9
Тел.: +7(4967)31-01-92
E-mail: masspref@yandex.ru*

Сергей Владимирович Смуров

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

Алексей Николаевич Царьков

*заслуженный деятель науки РФ
доктор технических наук, профессор
Президент Института –
Председатель Правления Института
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210 Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967) 35-31-93
E-mail: tsarkov@iifmail.ru*

Аннотация

На основе парных запутываний спиновых кубитов NV-центров при комнатных температурах обсуждаются пути возможной телепортации на близких и дальних расстояниях между центрами отправителя и получателя.

Ключевые слова: многокубитные составные квантовые системы, типы квантовой запутанности, NV-центры в алмазе, спин-электрон и спин-ядерные кубиты, матрица плотности.

Summary

On the basis of pair entanglements of spin qubits of NV centers at room temperatures, possible ways of teleportation at close and long distances between the sender and receiver centers are discussed.

Keywords: multi-qubit composite quantum systems, types of quantum entanglement, NV-centers in diamond, spin-electron and spin-nuclear qubits, density matrix.

Успешное создание квантовой сети, способной распределять и обрабатывать запутанность между удаленными узлами, основано на соединении множества оптически активных узлов размещения, стационарных кубитов, разделенных десятками или сотнями километров, посредством обмена квантовой информацией, переносимой летающими кубитами, фотонами, распространяющимися либо в оптических волокнах, либо в окружающей атмосферной (космической) среде. Одной из наиболее перспективных платформ для стационарных кубитов квантовой сети является азотно-вакансионный

(NV) центр в алмазе, который, благодаря реализованным схемам оптической инициализации и считывания спин-электронных и спин-ядерных (азот ^{14}N спин $I=1$ и ^{15}N спин $I=1/2$) состояний, можно использовать как при криогенных, так и при комнатных температурах [1-3]. Основная цель состоит в том, чтобы объединить все эти элементарные составляющие блоки, чтобы продемонстрировать практическую реализацию квантовой сети на основе запутывания, поддерживаемой NV-центрами в алмазе в качестве стационарных кубитов и их надежной связи с фотонами-летающими кубитами.

Как мы уже отмечали, в мировой практике реализованы начинания в двух экспериментальных схемах запутывания спин-электронных состояний, спин-электрон-фотонных, спин электрон-ядерных состояний в системе двух твердотельных кубитов, соответствующих низким температурам, и при комнатных температурах [1-3]. При криогенных температурах к спин-селективным оптическим переходам можно обращаться по отдельности, что позволяет генерации связи между спин-фотон и спин-спиновой запутанностями (стационарный кубит–летающий кубит интерфейс), что позволило в этой схеме достигнуть запутанности и телепортации на лабораторных расстояниях между NV-центрами до 3-х метров и больше. В схемах при комнатной температуре аналогичные эксперименты с запутыванием были совершены при дистанции 25 нм между двумя NV-центрами. При комнатной температуре запутывание происходит между спин-электронными состояниями между двумя NV-центрами, благодаря дипольному спин-спин электронному взаимодействию. На сегодняшний день можно рассмотреть несколько вариантов создания телепортации при комнатной температуре:

I) Телепортация внутри двух НВЦ на близких расстояниях до 25-30 нм с 3-мя (4-мя кубитами) по протоколу на рис.2, где реализуется телепортация между двумя NV A и NV B центрами, находящимися на расстоянии $r_{AB} \approx 25-30$ нм, с двумя спин-электронными запутанными кубитами (на рисунке 2 NVA кубит 2 и NVB кубиты 3) и исходным кубитом (на рисунке 2 NVA кубит 1), подготовленным на ядерном спине азота ^{15}N (кутрит ^{14}N), которое должно быть телепортировано на электронный-спин NVB (на рисунке 1 кубит 3).

II) телепортация между двумя ($i=1, 2$) удаленными парами (NV A1, NVB1) (NVA2, NVB2) со своими спин-электронными кубитами (всего 4 спин-электронных кубита с соответствующим протоколом запутывания) $\{NV_{IA} \longleftrightarrow_{20-25nm} NV_{IB}\} \longleftrightarrow_{3-5метра} \{NV_{IIA} \longleftrightarrow_{20-25nm} NV_{IIB}\}$ и дополнительной станцией ИБС (проектное Измерение Состояний Белла), находящейся где-нибудь в третьем месте (протокол на рисунке 2.). Этот протокол использует передачу запутанности от одной пары запутанных кубитов друой паре кубитов. Для телепортации можно будет использовать как и в случае I) спин-ядерный кубит одного из NV-центров или добавить еще одну пару NV-центров и рассмотреть протокол с двух-кубитной телепортацией. Для обоих вариантов надо добиваться реализации:

1) построения связей («интерфейсы») между спин-электрон (ядро) стационарными кубитами NV и спин-фотон- летающими кубитами;

2) осуществления измерения Белловских состояний для передачи информационного кубита от отправителя до получателя, используя уже построенные запутанные состояния между ними. Это очень важный момент, который следует учитывать для любой многокубитной схемы телепортации с использованием NV-центров, которая может быть еще должна быть разработана до самых тонких деталей, поскольку измерение Белла действительно является основной экспериментальной проблемой;

3) схема должна быть реализована как можно быстрее, так как запутанное состояние между двумя сближенными NV центрами нестабильно.

Так, измеренные времена жизни запутанных состояний ψ^\pm, ϕ^\pm ограниченные спиновой дефазировкой, составляют $T_2^* \approx 20 - 30$ мкс.

Два электронных спина NVA и NVB взаимодействуют через свои магнитные моменты согласно гамильтониану взаимодействия

$$H_{AB} \approx \hbar \kappa_{\text{дип}} S_{zA} S_{zB}$$

с дипольной силой взаимодействия

$$\kappa_{\text{дип}} = \kappa_0 (3 \overline{\cos^2 \theta} - 1), \quad \kappa_0 = \frac{\mu_0 \gamma_{NV}^2 \hbar}{6\pi r^3} \approx 3 \cdot 10^{23} / r^3 \text{ кГц}$$

Чтобы создать запутывание высокой точности, необходимо условие сильной связи, $\kappa_{\text{дип}} > 1/T_2^*$, где T_2^* – соответствующее время дефазировки.

Измеренная дипольная константа связи $k_{\text{дип}} \approx 5$ кГц путем использования кутрита двух спинов в паре NV может быть увеличена в 4 раза $k_{\text{дип}} \approx 20$ кГц. Измеренные значения для дипольного взаимодействия допускают между двумя дефектами максимальное расстояние 30 нм.

С самого начала Алиса владеет состоянием, которое должно быть телепортировано (кубит 1)

$$|\psi\rangle_1 = \alpha|0\rangle_1 + \beta|1\rangle_1.$$

Алиса и Боб имеют по одному кубиту спутанной пары (кубиты 2 и 3) в совместном состоянии

$$|\psi^-\rangle_{23} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|01\rangle_{23} - |10\rangle_{23}).$$



Рис. 1. Протокол телепортации по Беннету и др.

Объединенное состояние всех трех кубитов можно переписать как

$$|\psi\rangle_{123} = \frac{1}{2} (|\phi^+\rangle_{12} (\alpha|1\rangle_3 - \beta|0\rangle_3) + |\phi^-\rangle_{12} (\alpha|1\rangle_3 + \beta|0\rangle_3) + |\psi^+\rangle_{12} (-\alpha|1\rangle_3 - \beta|0\rangle_3) - |\psi^-\rangle_{12} (\alpha|1\rangle_3 + \beta|0\rangle_3)$$

где $|\phi^\pm\rangle_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle \pm |11\rangle)$,
 $|\psi^\pm\rangle_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle \pm |10\rangle)$ – четыре состояния Белла.

Чтобы телепортировать квантовое состояние, Алиса выполняет совместное измерение на своих кубитах (кубиты 1 и 2) в базисе Белла, проецируя кубит Боба в состояние, которое вплоть до унитарной операции (U) зависит от результата измерения Алисы. Алиса отправляет результат через классический канал связи Бобу, который затем может восстановить исходное состояние $|\psi\rangle_1$, применив соответствующее локальное преобразование (U).

Телепортация подсистемы, в которой запутанная пара превращается в протокол обмена перепутывания, где два удаленных состояния могут запутаться без прямого взаимодействия. Следуя возможности создания телепортации на основе NV-центров при комнатной температуре, целесообразно для начала рассмотреть в лабораторных условиях систему, состоящую из двух пар $\{NV_{IA}, NV_{IB}\}$ и $\{NV_{IA}, NV_{IB}\}$, разнесенных на дистанцию 3-5 метра.

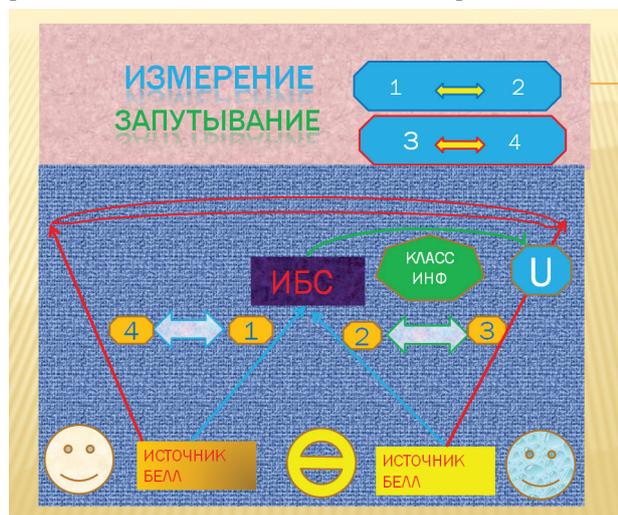


Рис. 2. Запутывание через обмен запутанными состояниями

Такая система описывается гамильтонианом

$$H = \sum_{i=1,2} (H_A^i + H_B^i + H_{AB}^i),$$

где H_A^i и H_B^i – гамильтонианы двух $i=I, II$ пар независимых центров;

H_{AB}^I, H_{AB}^{II} описывают для каждой пары $i=I, II$ дипольные взаимодействия между NV_{IA} и NV_{IB}, NV_{IIA} и NV_{IIB} .

Протокол перестановки запутывания реализуется посредством генерации двух запутанных пар, «0» и «1» и кубитов «2» и «3», например, максимально запутанных синглетных состояний

$$|\psi^-\rangle_{01} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|1\rangle_0 |0\rangle_1 - |0\rangle_0 |1\rangle_1)$$

$$|\psi^-\rangle_{23} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|1\rangle_2 |0\rangle_3 - |0\rangle_2 |1\rangle_3),$$

где $|H\rangle$ и $|V\rangle$ обозначают состояния горизонтальной и вертикальной поляризации соответственно.

Квантовое состояние

$$|\psi\rangle_{0123} = |\psi^-\rangle_{01} \otimes |\psi^-\rangle_{23}$$

$$|\psi\rangle_{0123} = \frac{1}{2} (|\psi^+\rangle_{03} \otimes |\psi^+\rangle_{12} - |\psi^-\rangle_{03} \otimes |\psi^-\rangle_{12} - |\phi^+\rangle_{03} \otimes |\phi^+\rangle_{12} + |\phi^-\rangle_{03} \otimes |\phi^-\rangle_{12})$$

Следовательно, так называемое измерение состояния Белла (ИБС) между кубитами «1» и «2» приводит к случайному получению одного из четырех максимально запутанных состояний Белла $|\psi^\pm\rangle_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|1\rangle_1 |0\rangle_2 \pm |0\rangle_1 |1\rangle_2)$, $|\phi^\pm\rangle_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|1\rangle_1 |1\rangle_2 \pm |0\rangle_1 |0\rangle_2)$

с равной вероятностью 1/4. Посредством этого измерения кубиты «0» и «3» проецируются в то же запутанное состояние, что и кубитов «1» и «2». Таким образом, перепутывание меняется от кубитов «0-1» и «2-3» к кубитам «1-2» и «0-3». Эту процедуру также можно рассматривать как телепортацию состояния кубита «1» на кубит «3» или кубит «2» на кубит «0».

Литература

1. Doldeet F. // Nature Phys, 2013. №9. Pp.139-143.
2. Bernien H. // Nature, 2014. V.497.
3. Смуров С.В., Масликов А.А., Волков Г.Г. Идеи и методы генерации запутывавния твердотельных спин-кубитов. Квантовая запутанность двух систем // Известия Института инженерной физики, 2019. №1(51). С.58-65.

СОБЫТИЯ

УРА! У НАС СВОЙ ДИСССОВЕТ!

На основании рекомендации Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации на базе Межрегионального общественного учреждения «Институт инженерной физики» как ведущей научной организации приказом Министерства науки и высшего образования РФ от 1 февраля 2019 года создан специальный диссертационный совет ДС 522.001.01. Председатель совета – Президент Института – Председатель Правления Института заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор Алексей Николаевич Царьков.



Диссертационному совету дано право принимать к защите и проводить защиты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по научным специальностям:

05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций (технические науки);

05.13.19 – Методы и системы защиты информации, информационная безопасность (технические науки).

В состав совета входят 20 докторов наук и один кандидат технических наук, среди которых профессора и доценты, заслуженные деятели науки и техники РСФСР, заслуженные деятели науки РФ, заслуженные работники высшей школы РФ, заслуженные изобретатели РФ, почетные работники науки и техники РФ, почетные радисты РФ, почетные геодезисты РФ. Все доктора наук имеют большой опыт работы в диссертационных советах.

Диссертационный совет сохраняет и развивает положительные традиции в системе подготовки научных и научно-педагогических кадров, заложенные в Институте в период функционирования на его базе открытого диссертационного совета Д 520.033.01, в котором за время его работы с 2010 года было успешно защищено 30 диссертаций, две из которых – на соискание ученой сте-

пени доктора технических наук.

Создание специального диссертационного совета – закономерный этап становления Института как динамично развивающейся организации оборонно-промышленного комплекса России, играющей все более важную роль в разработке специальных систем и средств связи, методов и систем защиты информации и обеспечения информационной безопасности. Институт ориентирован на реализацию полного инновационного цикла создания перспективных образ-

цов изделий – от инновационной идеи до серийной поставки.

28 февраля состоялось первое заседание диссосовета, на котором А.Н. Царьков довел до членов совета требования действующих положений о диссертационных советах, касающиеся порядка работы диссосовета, требования нормативных документов Департамента по аттестации научных и научно-педагогических работников, Президиума ВАК к организациям, на базе которых создан диссертационный совет, а также требования к публикационной активности членов диссосовета. Был рассмотрен предварительный план защит диссертаций на 2019 год.

Поздравляем ученых, всех сотрудников Института инженерной физики с таким важным событием, как создание диссертационного совета!





AUTHORS

Antokhin Evgeny A. Head of Research and Testing Department FSBI «Main Research and Testing Center for Robotics» of the Ministry of Defense of the Russian Federation. Moscow, st. Seryogina, 5.

Antsibor Sergey V. Graduate student of Devices and biotechnical systems chair of Tula State University. Tula, Lenin Prospekt, 92.

Atakishchev Oleg I. Doctor of Technical Sciences, professor. Deputy General Director for Special Projects. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

Bezrodny Boris F. Doctor of technical sciences, professor. Head of the Department of Applied Mathematics. Moscow State Automobile and Roads Technical University. Moscow, Leningradsky Prospekt, 64.

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.

Bukharov Eugeniy O. Candidate of Technical Sciences. Deputy Head of Research Department. Krasnodar Higher Military School named after General Shtemenko. Krasnodar, Krasina St., 4.

Chernova Plamena D. Department researcher. FSBI «Main Research and Testing Center for Robotics» of the Ministry of Defense of the Russian Federation. Moscow, st. Seryogina, 5.

Emelin Nikolay M. Honored Scientist of the RSFSR, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of FSBSE «Gosmetodcentr». Moscow, Lyusinovskaya street, 51.

Gnedin Roman V. Head of department. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

Gribunin Vadim G. Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation. Doctor of Technical Science. Chief Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Guseva Anastasia S. Graduate student. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Ignatenko Igor A. Herd of Special Mathematical Software. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Ionkina Helena G. Candidate of Medical Sciences, Associate Professor. Normal Physiology Dept. I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University). Moscow, Mokhovaya Str., 11 (4).

Ivakhno Natalia V. Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, professor of Devices and biotechnical systems chair of Tula State University. Russia, Tula, Lenin Prospekt, 92.

Ivashchenko Oleg Yu. Head of the Faculty. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

Karakashev Aleksey V. Graduate student. Head of department. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Kazakov Rafael R. Senior Lecturer. Military Space Academy. A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, ul. Zhdanovskaya, 13.

Kolchin Andrei V. Candidate in Physics & Mathematics, Associate Professor Applied Mathematics Dept. Moscow State Automobile and Roads Technical University. Moscow, Leningradsky Prospekt, 64.

Kolombet Eugeniy V. Junior scientist. Head of the laboratory. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

Kolombet Valeriy A. Candidate of Physical and Mathematical Sciences. Head of the laboratory. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

Konnov Sergey A. Lecturer of «Electricity missiles» Military Academy of Strategic Missile Forces. Moscow reg., Balashiha, Karbysheva st., 8.

Korobkov Alexey A. Candidate of Technical Sciences, associate Professor, head of scientific and methodological Department. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Korotin Alexander M. Junior researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Kudrya Roman A. Cadet. Krasnodar Higher Military School named after General Shtemenko. Krasnodar, Krasina Street, 4.

Kurguzov Valery V. Lecturer. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.



AUTHORS

Kvashennikov Vladislav V. Doctor of Technical Sciences. Leading Researcher. JSC «Kaluga Research Institute of Telemechanical Devices». Kaluga, ul. K. Marx, 4.

Lesnykh Vadim N. Junior scientist. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

Maslikov Alexander A. Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor. Senior Researcher. Branch «Protvino» State University «Dubna». Moscow region, Protvino, Severny passage, 9.

Nadezhdin Evgeny N. Doctor of Technical Sciences, Professor. Professor of the Department of Informatics and information technologies, Tula state pedagogical University named after L.N. Tolstoy. Tula, Lenin Prospekt, 125.

Panasenko Nikolay N. Candidate of Technical Sciences. Department researcher. FSBI «Main Research and Testing Center for Robotics» of the Ministry of Defense of the Russian Federation. Moscow, st. Seryogina, 5.

Shabalyn Oleg V. Candidate of technical Sciences. Head of support Department R&D. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Shaimardanov Albert M. Candidate of Technical Sciences. Lecturer of the Department of onboard information and measuring systems of spacecraft Military space Academy named after A.F. Mozhaiskiy. St. Petersburg, ul. Zhdanovskaya, 13.

Sharanov Dmitry A. Post-graduate student of Shuisky branch of «Ivanovo state University». Ivanovo region, Shuya, street Cooperative, 24.

Shelamov Sergey V. Candidate of Technical Sciences. Deputy Head of Department. FGBU 4 Central Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation. Moscow Region, Korolev, md Yubileyny, st. M.K. Tikhonravov, 29

Shevchenko Vyatcheslav A. Candidate of Technical Sciences. Head of Division – Deputy Head of the Main Directorate for the Development of Information and Telecommunication Technologies of the Ministry of Defense of the Russian Federation. Moscow, Znamenka Str., 19.

Shmyrin Evgeny V. Candidate of Technical Sciences. Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Smirnov Dmitriy V. Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, associate professor. Full member of the Academy of Engineering Sciences. Professor of the Department FSBEI of HE MAI (NRU). General director – First Vice-President of Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Smirnov Vladimir A. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Devices and Biotechnical Systems» FSBEI of HE «Tula State University». Tula, Lenin Avenue, 92.

Smirnov Yaroslav D. Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

Smurov Sergey V. Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, professor. Deputy director general. General designer. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Starodoubtsev Pavel E. Head of department. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

Svetilov Mikhail A. Head 2 directions 7 management. Main operational management of the General Staff of the Armed Forces.

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.

Volkov Gennadiy G. Doctor of physical and mathematical sciences, professor. Senior Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Zakharov Vladimir L. Doctor of Military Sciences, professor. Full member of the Academy of Military Sciences. Professor. FSBEI of HE MAI (NRU). Moscow, Volokolamsk Highway, 4.

Zelenevsky Vladimir V. Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation Doctor of Technical Sciences, Professor, professor of the department. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Force. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

Zikin Sergey I. Graduate student of Devices and biotechnical systems chair of Tula State University. Tula, Lenin Prospekt, 92.



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.



CONTENTS

INSTRUMENT MAKING, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES AND SYSTEMS

Zikin S.I., Antsibor S.V., Ivakhno N.V.

Mathematical model of selection of initial resistance in the respiratory circuit on the basis of diagnostic matrix status data 2

Smirnov V.A., Shelamov S.V.

Error analysis of analog-to-digital signal processing of a sine-cosine rotating transformer 7

Kolchin A.V., Ionkina H.G., Bezrodny B.F.

On some aspects of the registration and processing of low-current electrical signals 11

Kazakov R.R., Zakharov V.L., Smirnov D.V.

The current state and prospects for the development of optical-electronic means of spacecraft 14

Kolombet V.A., Lesnykh V.N., Kolombet E.V.

On the emerging perspective of overriding the duration of a second and the length of a meter 19

Konnov S.A.

Mathematical model of diagnosing an object of electric power equipment with the classification of the technical state in a fuzzy logic system 22

RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATION

Shevchenko V.A.

A union bound on error probability in the channel with memory using coding and pseudo-random interleaving 26

Kvashennikov V.V.

Multidimensional cascade codes and algorithms iterative decoding 32

Svetilov M.A.

Methods of assessing the efficiency of delivering messages in the transport network of the telecommunications subsystem ACS for general use 36

Zelenevsky V.V., Shmyrin E.V., Kurguzov V.V.

Mathematical model of the modem of the tropospheric radio channel with code orthogonal data compression 39

INFORMATION SCIENCE, COMPUTING AND MANAGEMENT

Nadezhdin E.N., Sharanov D.A., Shabalin O.V., Ignatenko I.A.

To the problem of competitiveness of software products of domestic production 43

Ivashchenko O. Yu.

Online optimization of time parameters of radiation, chemical and biological protection for special objects 48

Karakashev A.V., Guseva A.S.

The algorithm for increasing the noise immunity of the implementation of the authentication label based on signals with an extended spectrum 53

Karakashev A.V., Gribunin V.G., Shelamov S.V.

A comparison of cryptographic and steganographic methods of protection system of encrypted communication from imposing false multimedia information during transmission over the radio channel in terms of intentional interference 56

Gnedin R.V., Gribunin V.G.

The features of ensuring trust in heterogeneous information systems 60

Starodubtsev P.E., Bukharov E.O., Kudrya R.A., Smirnov Ya.D.

Determination of the main opportunities of the information systems security infringer by connection in the topology of the network of false network information objects 64

Antokhin E.A., Atakishchev O.I., Panasenko N.N., Chernova P.D.

Ensuring the safety of testing unmanned aerial vehicles for military and special purposes 71

Zakharov V.L., Smirnov D.V., Shaimardanov A.M.

Mathematical models of automatic control systems with pulse width modulation 77

Zakharov V.L., Smirnov D.V., Kazakov R.R., Korobkov A.A.

The method of determining the scatter region of the initial motion parameters of the separating parts, taking into account the operational data on the state of the atmosphere in areas of incidence 84

Smirnov D.V., Korotin A.M.

The definition of the update procedure for security parameters, applied within the method for constructing integrity monitoring systems for critical information in ALS based on broadcast radio channel 89

ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND ROBOTICS

Bugakov I.A., Tzar'kov A.N.

On the «real» artificial intelligence for the development of the Arctic 93

SCIENTIFIC REVIEWS. SCIENTIFIC CRITIQUES. COMMENTS

Emelin N.M.

How to improve the quality control of the List of peer-reviewed publications 101

Volkov G.G., Maslikov A.A., Smurov S.V., Tzar'kov A.N.

On the multi-qubit entanglement schemes and teleportation based on NV-centers in a diamond 103

EVENTS 106

AUTHORS 107

THE ETHICS OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS 109

REQUIREMENTS TO AUTHORS 110



**Межрегиональное
общественное
учреждение**

**«Институт
инженерной
физики»**

(МОУ «ИИФ»)

**научное, образовательное
и производственное
учреждение**