

## НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ЗЕМЛИ

### HIGH TECHNOLOGIES IN EARTH SPACE RESEARCH

Журнал **H&ES Research** издается с 2009 года, освещает достижения и проблемы российских инфокоммуникаций, внедрение последних достижений отрасли в автоматизированных системах управления, развитие технологий в информационной безопасности, исследования космоса, развитие спутникового телевидения и навигации, исследование Арктики. Особое место в издании уделено результатам научных исследований молодых ученых в области создания новых средств и технологий космических исследований Земли.

**Журнал H&ES Research входит в перечень изданий, публикации в которых учитываются Высшей аттестационной комиссией России (ВАК РФ), в систему российского индекса научного цитирования (РИНЦ), а также включен в Международный классификатор периодических изданий.**

Тематика публикуемых статей в соответствии с перечнем групп специальностей научных работников по Номенклатуре специальностей:

- 05.11.00 Авиационная и ракетно-космическая техника
- 05.12.00 Радиотехника и связь
- 05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление.

#### ИНДЕКСИРОВАНИЕ ЖУРНАЛА H&ES RESEARCH

- NEICON • CyberLenika (Open Science) • Google Scholar • OCLC WorldCat • Ulrich's Periodicals Directory • Bielefeld Academic Search Engine (BASE) • eLIBRARY.RU • Registry of Open Access Repositories (ROAR)

Все номера журнала находятся в свободном доступе на сайте журнала [www.hes.ru](http://www.hes.ru) и библиотеке [elibrary.ru](http://elibrary.ru).

Всем авторам, желающим разместить научную статью в журнале, необходимо оформить ее согласно требованиям и направить материалы на электронную почту: [HT-ESResearch@yandex.ru](mailto:HT-ESResearch@yandex.ru). С требованиями можно ознакомиться на сайте: [www.H-ES.ru](http://www.H-ES.ru).

Язык публикаций: русский, английский.  
Периодичность выхода – 6 номеров в год.  
Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 77-60899 от 02.03.2015  
Территория распространения: Российская Федерация, зарубежные страны

Тираж 1000 экз. Цена 1000 руб.  
Плата с аспирантов за публикацию рукописи не взимается.

© ООО «ИД Медиа Паблшер», 2020

**H&ES Research** is published since 2009. The journal covers achievements and problems of the Russian infocommunication, introduction of the last achievements of branch in automated control systems, development of technologies in information security, space researches, development of satellite television and navigation, research of the Arctic. The special place in the edition is given to results of scientific researches of young scientists in the field of creation of new means and technologies of space researches of Earth.

**The journal H&ES Research is included in the list of scientific publications, recommended Higher Attestation Commission Russian Ministry of Education for the publication of scientific works, which reflect the basic scientific content of candidate and doctoral theses. IF of the Russian Science Citation Index.**

Subject of published articles according to the list of branches of science and groups of scientific specialties in accordance with the Nomenclature of specialties:

- 05.07.00 Aviation, space-rocket hardware
- 05.12.00 RF technology and communication
- 05.13.00 Informatics, computer engineering and control.

#### JOURNAL H&ES RESEARCH INDEXING

All issues of the journal are in a free access on a site of the journal [www.hes.ru](http://www.hes.ru) and [elibrary.ru](http://elibrary.ru).

All authors wishing to post a scientific article in the journal, you must register it according to the requirements and send the materials to your email: [HT-ESResearch@yandex.ru](mailto:HT-ESResearch@yandex.ru). The requirements are available on the website: [www.H-ES.ru](http://www.H-ES.ru).

Language of publications: Russian, English.  
Periodicity – 6 issues per year.  
Media Registration Certificate PI No. FS77-60899. Date of issue: March 2, 2015.  
Distribution Territory: Russian Federation, foreign countries

Circulation of 1000 copies. Price of 1000 Rub.  
Postgraduate students for publication of the manuscript will not be charged

© "Media Publisher", LLC 2020

4  
2020

**Учредитель:**

ООО «ИД Медиа Паблшер»

**Издатель:**

ДЫМКОВА С.С.

**Главный редактор:**

ЛЕГКОВ К.Е.

**Редакционная коллегия:**

**БОБРОВСКИЙ В.И.**, д.т.н., доцент;

**БОРИСОВ В.В.**, д.т.н., профессор,

Действительный член академии

военных наук РФ;

**БУДКО П.А.**, д.т.н., профессор;

**БУДНИКОВ С.А.**, д.т.н., доцент,

Действительный член Академии

информатизации образования;

**ВЕРХОВА Г.В.**, д.т.н., профессор;

**ГОНЧАРЕВСКИЙ В.С.**, д.т.н., профессор,

заслуженный деятель науки

и техники РФ;

**КОМАШИНСКИЙ В.И.**, д.т.н., профессор;

**КИРПАНЕВ А.В.**, д.т.н., доцент;

**КУРНОСОВ В.И.**, д.т.н., профессор,

академик Международной академии

информатизации, Действительный член

Российской академии естественных наук;

**МОРОЗОВ А.В.**, д.т.н., профессор,

Действительный член Академии

военных наук РФ;

**МОШАК Н.Н.**, д.т.н., доцент;

**ПАВЛОВ А.Н.**, д.т.н., профессор;

**ПРОРОК В.Я.**, д.т.н., профессор;

**СЕМЕНОВ С.С.**, д.т.н., доцент;

**СИНИЦЫН Е.А.**, д.т.н., профессор;

**ШАТРАКОВ Ю.Г.**, д.т.н., профессор,

заслуженный деятель науки РФ.

**Адрес издателя:**

111024, Россия, Москва,

ул. Авиамоторная, д. 8, офис 512-514.

**Адрес редакции:**

194044, Россия, Санкт-Петербург,

Лесной Проспект, 34-36, к. 1,

Тел.: +7(911) 194-12-42.

**Адрес типографии:**

Россия, Москва, ул. Складочная, д. 3, кор. 6.

Мнения авторов не всегда совпадают с точкой зрения редакции. За содержание рекламных материалов редакция ответственности не несет. Материалы, опубликованные в журнале – собственность ООО «ИД Медиа Паблшер». Перепечатка, цитирование, дублирование на сайтах допускаются только с разрешения издателя.

## СОДЕРЖАНИЕ

### АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

**Асадов Х.Г., Абдуллаева С.Н., Агаев Ф.Ф.**

Двухступенчатый четырехволновый метод измерения двух газовых составляющих атмосферы с помощью солнечного фотометра с двухпараметрической аэрозольной коррекцией.....

6

**Силантьев А.Б., Бабкин Ю.В., Тимошенко А.В., Якубовский С.В.**

Обнаружение и сопровождение высокоорбитальных космических объектов с использованием алгоритма многообзорного наблюдения.....

15

### РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

**Винограденко А.М.**

Метод синтеза интеллектуальных систем контроля технического состояния территориально-распределенных комплексов связи специального назначения.....

24

**Колмогоров О.В., Дейкун А.В., Чемесова Е.В.**

Установка для измерений задержек распространения сигналов в оптических элементах.....

36

**Пугачев А.Ю., Татаров М.О., Мурашов А.А.**

Формализация неисправностей радиоэлектронной аппаратуры при проектировании диагностических систем сложных технических комплексов.....

44

### ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

**Бунякина Е.В., Гальченко М.И.**

Применение фреймворка H2O в обработке временных рядов.....

56

**Королев И.Д., Назинцев В.С., Мезенцев А.С., Махнев А.П.**

Методика формирования электронных дел системы электронного документооборота.....

65

**Орлов Г.А., Красов А.В., Гельфанд А.М.**

Применение Big Data при анализе больших данных в компьютерных сетях.....

76



# CONTENTS

## AVIATION, SPACE-ROCKET HARDWARE

### **Asadov H.H., Abdullayeva S.N., Agayev F.F.**

Two stages four wavelengths method for measuring two gas components of atmosphere using sun photometer with two parametric aerosol correction ..... 6

### **Silantyev A.B., Babkin Yu.B., Timoshenko A.V., Yakubovsky S.V.**

Detection and observation of high-altitude space objects using the multi-view observation algorithm..... 15

## RF TECHNOLOGY AND COMMUNICATION

### **Vinogradenko A.M.**

Method of synthesis of intelligent systems for control of technical condition of geographically distributed communication complexes of special purpose. .... 24

### **Kolmogorov O.V., Deikun A.V., Chemesova E.V.**

Installation for measuring signal propagation delays in optical elements ..... 36

### **Pugachev A.Y., Tatarov M.O., Murashov A.A.**

Radio electronic equipment malfunction formalization for Complicated Technical Complexes Diagnostic Systems ..... 44

## INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

### **Bunyakina E.V., Galchenko M. I.**

Application of H2O framework in time series processing ..... 56

### **Korolev I.D., Nazintsev V. S., Mezentsev A.S., Makhnev A.P.**

Model of the digital case formation of electronic document management system ..... 65

### **Orlov G.A., Krasov A.V., Gelfand A.M.**

The use of Big Data in the analysis of big data in computer networks..... 76

#### **Founder:**

"Media Publisher", LLC

#### **Publisher:**

DYMKOVA S.S.

#### **Editor in chief:**

LEGKOV K.E.

#### **Editorial board:**

**BOBROWSKY V.I.**, PhD, Docent;  
**BORISOV V.V.**, PhD, Full Professor;  
**BUDKO P.A.**, PhD, Full Professor;  
**BUDNIKOV S.A.**, PhD, Docent,  
Actual Member of the Academy of Education Informatization;  
**VERHOVA G.V.**, PhD, Full Professor;  
**GONCHAREVSKY V.S.**, PhD, Full Professor,  
Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation;  
**KOMASHINSKIY V.I.**, PhD, Full Professor;  
**KIRPANEV A.V.**, PhD, Docent;  
**KURNOSOV V.I.**, PhD, Full Professor,  
Academician of the International Academy of Informatization, law and order,  
Member of the Academy of Natural Sciences;  
**MOROZOV A.V.**, PhD, Full Professor,  
Actual Member of the Academy of Military Sciences;  
**MOSHAK N.N.**, PhD, Docent;  
**PAVLOV A.N.**, PhD, Full Professor;  
**PROROK V.Y.**, PhD, Full Professor;  
**SEMENOV S.S.**, PhD, Docent;  
**SINICYN E.A.**, PhD, Full Professor;  
**SHATRAKOV Y.G.**, PhD, Full Professor,  
Honored Worker of Science of the Russian Federation.

#### **Address of publisher:**

111024, Russia, Moscow,  
st. Aviamotornaya, 8, office 512-51

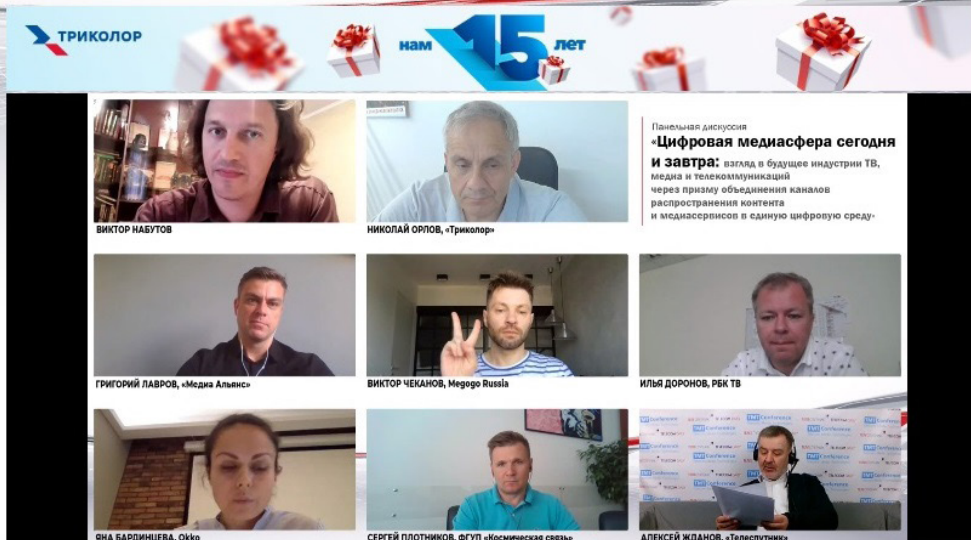
#### **Address of edition:**

194044, Russia, St. Petersburg,  
Lesnoy av., 34-36, h.1,  
Phone: +7 (911) 194-12-42.

#### **Address of printing house:**

Russia, Moscow, st. Skladochnaya, 3, h. 6

The opinions of the authors don't always coincide with the point of view of the publisher. For the content of ads, the editorial Board is not responsible. All articles and illustrations are copyright. All rights reserved. No reproduction is permitted in whole or part without the express consent of Media Publisher Joint-Stock company.



## TeleMultiMedia Forum 2020: эксперты обсудили актуальные тенденции цифровой медиасферы

30 июня TMT Conference, совместно с «Телеспутником» и ИАА TelecomDaily и провели в онлайн-формате 4-й международный «TeleMultiMedia Forum 2020: Лидеры цифровой медиасферы». Участники форума обсудили перспективы создания универсальных экосистем, вопросы трансформации рынка медиаразвлечений и роль в этих процессах онлайн-кинотеатров, операторов связи и технологических компаний. Трансляцию мероприятия посмотрело более 600 человек.

Генеральным партнером форума выступил мультиплатформенный оператор цифровой среды «Триколор». Официальный партнер мероприятия – государственный оператор спутниковой связи ФГУП «Космическая связь», партнер круглого стола – «Ростелеком». Также партнерами форума выступили оператор цифрового и спутникового ТВ – компания «НТВ-Плюс» и платформа наземной доставки телеканалов «Медиалогистика» компании MSK-IX. Мероприятие было организовано при технической поддержке компании CDNvideo.

В ходе открывающей мероприятия панельной дискуссии, посвященной цифровой медиасфере и взгляду

экспертов на будущее индустрии ТВ, видеосервисов и телекоммуникаций, представители ведущих российских онлайн-кинотеатров и телеканалов рассказали о большом росте активности зрителей в период пандемии коронавируса. Модератором сессии выступил известный теле- и радиоведущий и продюсер Виктор Набутов.

По словам управляющего директора РБК ТВ Ильи Доронова, в марте вместе с ростом телесмотрения на телеканал пришла молодая аудитория. Большим спросом пользовались новости, что отражает общемировую тенденцию. Также стало очевидно, что большинство сотрудников телеканала может продуктивно работать в удаленной режиме.

«В самые напряженные дни у нас в офисе находились только шеф-редактор и телеведущий все остальные работали из дома. Но полностью перейти на удаленную работу не получится, в том числе, потому что зрители устали от интервью по Skype или Zoom и соскучились по качественной картинке», – уверен Доронов.

В области тематического ТВ ситуация с коронавирусом больше всего сказалась на спортивных телеканалах, сообщил генеральный директор

«Медиа Альянс» Григорий Лавров. В ситуации отмены всех крупных спортивных событий оказалось сложно удержать прежние показатели. «Ничто не может заменить прямых эфиров и тех долей, что давал ранее “Роллан Гаррос”», – посетовал спикер, добавив, что реклама «тоже просела».

Для онлайн-кинотеатров одна из самых актуальных тем последнего времени – создание собственного контента, в том числе съемки фильмов и сериалов. После снятия всех ограничений, связанных с коронавирусом, начнется бум производства такого контента, считает генеральный директор онлайн-кинотеатра Okko Яна Бардинцева. По ее оценке, это произойдет в начале 2021 года. Эксперт добавила, что отечественные видеосервисы пока в начале этого пути и первые проекты, завоевавшие аудиторию в среде онлайн, начали появляться только в 2019 году.

На рынке телеком-операторов сейчас происходят изменения, связанные со снижением активности корпоративных заказчиков, отметил директор Департамента инфо-коммуникационных технологий и мультимедийных услуг ФГУП «Космическая связь» Сергей Плотников. Отвечая



на вопрос о будущем спутникового телевидения и его конкуренции с ОТТ, эксперт напомнил, что сейчас во всем мире операторы связи создают универсальные экосистемы, которые способны удовлетворить потребности абонентов во всех средах доставки контента.

С этим согласился заместитель генерального директора по контентной политике оператора цифровой среды «Триколор» Николай Орлов, добавив, что в период пандемии наблюдался существенный рост спроса на услуги спутникового интернета, и он остается высоким даже после снятия ограничений. По словам спикера, в основном на это повлияли частные лица, предпочитающие жить за городом на самоизоляции.

Участники второй сессии под названием «Эволюция платформ: решения и технологии для нового медиапотребления в цифровой медиасфере» представили свое видение влияния инноваций и цифровых технологий на развитие медиапотребления.

Грядет смена парадигмы рынка развлекательного контента, взял первым слово генеральный директор компании «Платформы и решения» Егор Яковлев. На смену старым форматам будут приходиться новые, предлагающие большую активность и вовлеченность со стороны зрителей. Это уже происходит сейчас, если говорить про офлайн, – это иммерсивные спектакли, в онлайн – множество сервисов эротического содержания. По словам эксперта, переход к такой модели потребует новых технологических решений, и здесь открываются большие возможности для стартапов, именно им предстоит сделать прорыв в этой области, уверен Яковлев.

Для просмотра такого иммерсивного контента в онлайн нужно добиться низкой задержки в момент его доставки по каналам связи до пользователя, отметил генеральный директор CDNvideo Ярослав Городецкий. Его выступление было посвящено современным высокоскоростным протоколам стриминга в CDN и способам снижения задержки сигнала при трансляции видеоконтента.

Будущее не только за классическими телеканалами, но и за персональными и стриминговыми телеканалами, а также за VR, отметил директор проекта «Медиалогистика» MSK-IX Григорий Кузин. Также, по его мнению, активно продолжит развиваться сегмент разовых трансляций, бум на которые наблюдался во время карантина.

По словам руководителя отдела эксплуатации и технологической экспертизы «Триколор» Евгения Михеичева, в среднесрочной перспективе произойдет возврат к концепции Second screen, когда смартфон дополняет просмотр телепрограмм. Исследования показывают, что такой способ медиапотребления на протяжении последних 5-7 лет продолжает набирать популярность, но компании пока мало его используют для создания новых сервисов, отметил представитель «Триколора».

Участники завершающего форум круглого стола «Экономика подписок: как операторы и сервис-провайдеры трансформируют свой бизнес в экосистеме» поделились своим мнением о возможности создания в России универсальных онлайн-сервисов, о роли, отведенной в них медиаконтенту, и перспективах сотрудничества с компаниями из сферы ритейла.

По мнению директора департамента цифровых продуктов «НТВ-Плюс» Константина Смирнова, несмотря на стремление многих российских компаний построить некую гигантскую онлайн-платформу, где будут предусмотрены все популярные сервисы – это невозможно. «Никогда не получится построить один единственный маркет-плейс, зайдя на который человеку больше ничего не понадобится», – отметил спикер.

Григорий Кузин в своем выступлении описал основные требования к «идеальной экосистеме». По его словам, пользователи такого сервиса должны получать единый доступ по одной подписке и посредством нескольких кликов. Также важно обеспечить разнообразие видеоконтента, пользователям должны быть одновременно доступны видео по запросу, телеканалы и различные трансляции

– от концертов до спортивных игр. Он добавил, что в последнее время большинство онлайн-кинотеатров дополнили свою библиотеку контентом телеканалами и стали более универсальными и привлекательными для своих клиентов.

В свою очередь заместитель генерального директора по стратегическому и операционному маркетингу «Триколор» Андрей Нестеров считает, что поставщикам контента «сам бог велел создавать экосистемы». Сейчас многие операторы и онлайн-платформы собирают данные о своих клиентах, которые в дальнейшем можно использовать для рекомендаций не только по контенту, но и по различным продуктам. Эксперт добавил, что в «Триколоре» верят в будущее больших экранов и именно вокруг них оператор будет строить свою экосистему.

Благодарим всех участников и спикеров TeleMultiMedia Forum 2020. Ждем всех на форуме в следующем году!

#### **Организаторы Форума:**

TMT Conference, «Телеспутник» и ИАА Telecom Daily

#### **Генеральный цифровой партнер:**

мультиплатформенный оператор цифровой среды – «Триколор»

#### **Официальный партнер:**

Государственный оператор спутниковой связи – ФГУП «Космическая связь»

#### **Партнер круглого стола:**

«Ростелеком»

#### **Партнеры:**

Оператор цифрового и спутникового ТВ – «НТВ-ПЛЮС», Платформа наземной доставки телеканалов «Медиалогистика» компании MSK-IX

#### **Технический партнер:** CDNvideo

#### **По вопросам участия:**

Тел.: +7 (812) 448-11-08

E-mail: conf@tdaily.ru, telemultimedia.ru



doi: 10.36724/2409-5419-2020-12-4-6-14

# ДВУХСТУПЕНЧАТЫЙ ЧЕТЫРЕХВОЛНОВЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДВУХ ГАЗОВЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ АТМОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ СОЛНЕЧНОГО ФОТОМЕТРА С ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ АЭРОЗОЛЬНОЙ КОРРЕКЦИЕЙ

**АСАДОВ**

**Хикмет Гамид оглы<sup>1</sup>**

**АБДУЛЛАЕВА**

**Севиндж Новруз гызы<sup>2</sup>**

**АГАЕВ**

**Фуад Фахраддин оглы<sup>3</sup>**

## АННОТАЦИЯ

Последними достижениями развития многоволнового фотометрирования в направлении увеличения числа каналов и спектрального разрешения следует считать разработку гиперспектрометров и дифференциальных оптических абсорбционных спектрометров. В этих приборах механизм формирования многочисленных волновых каналов почти идентичен, а нейтрализация влияния аэрозолей осуществляются такими методами как усреднение, интегрирование и т.д. без учета различий в волновой зависимости оптической толщины фракционных составляющих аэрозоля. Отмечается, что при высокоточном солнечном фотометрировании необходим точный отдельный учет влияния каждой отдельной фракции аэрозоля. Причиной тому, являются как минимум, следующие факторы: многофракционность атмосферного аэрозоля, с учетом того, что волновые зависимости различных фракций существенно отличаются друг от друга; фактическое разнообразие источников аэрозолей, генерирующих аэрозольные частицы с отличающимися физико-химическими свойствами. В настоящей работе предлагается двухступенчатый четырехволновый метод с двухпараметрической коррекцией, в котором количество измеряемых газов увеличивается до двух. Несмотря на свою двухступенчатость реализации, предложенный метод не предусматривает двойного увеличения объема операций, выполняемых в обычном трехволновом методе с двухпараметрической коррекцией. По сути дела в предлагаемом методе измерения осуществляются на специально подобранных четырех длинах волн, при котором рост количества измеряемых длин волн на одну треть приводит к двукратному увеличению количества измеряемых газов. В результате проводимых экспериментально-модельных исследований четырехволнового двухступенчатого метода получены следующие оценки общего количества паров воды и озона:  $W = 2$  см;  $X = 0,3$  см, которые неплохо согласуются с известными данными по Азербайджану, согласно которым средние значения  $W$  и  $X$  составляют 2-3 см и 0,3-0,33 см.

## Сведения об авторах:

<sup>1</sup>д.т.н., профессор, начальник отдела НИИ Аэрокосмической информатики Национального аэрокосмического агентства, г. Баку, Азербайджан, asadzade@rambler.ru

<sup>2</sup>к.т.н., доцент, доцент Азербайджанского государственного университета нефти и промышленности, г. Баку, Азербайджан, abdullayevasn@rambler.ru

<sup>3</sup>докторант Национального аэрокосмического агентства, г. Баку, Азербайджан

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: фотометр; аэрозоль; малые газы; калибровка; измерения.

**Для цитирования:** Асадов Х.Г., Абдуллаева С.Н., Агаев Ф.Ф. Двухступенчатый четырехволновый метод измерения двух газовых составляющих атмосферы с помощью солнечного фотометра с двухпараметрической аэрозольной коррекцией // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2020. Т. 12. № 4. С. 6-14. doi: 10.36724/2409-5419-2020-12-4-6-14

## Введение

Хорошо известно, что классическим примером многоволнового фотометрирования является двухволновый метод Добсона для измерения общего содержания озона в атмосфере, предложенный в 30-е годы прошлого столетия. В дальнейшем этот метод был развит, появился 4-х волновый, усовершенствованный вариант этого метода, который был воплощен в известном спектрофотометре Добсона [1]. Этот прибор совместно с другими, более современными приборами и по сей день используются в различных озонометрических сетях. Общая идея проведения комбинированных многоволновых измерений далее развивалась в направлении увеличения количества измеряемых параметров, т.е. газовых составляющих суммарной оптической толщины атмосферы с применением каких-либо общих мер для устранения мешающего влияния атмосферного аэрозоля. Типичными достижениями развития многоволнового фотометрирования в данном направлении следует считать гиперспектрометров и дифференциальных оптических абсорбционных спектрометров. В этих приборах механизм формирования многочисленных волновых каналов почти идентичен, а нейтрализация влияния аэрозолей осуществляются такими методами как усреднение, интегрирование и т.д. без учета различий в волновой зависимости фракционных составляющих аэрозоля.

Вместе с тем, при высокоточном солнечном фотометрировании необходим точный отдельный учет влияния отдельных фракций аэрозоля. Причиной тому, являются как минимум, следующие факторы:

1. Многофракционность атмосферного аэрозоля, с учетом того, что волновые зависимости различных фракций существенно отличаются друг от друга [2].
2. Фактическое разнообразие источников аэрозолей, генерирующих аэрозольные частицы с отличающимися физико-химическими свойствами.

Одним из наиболее существенных шагов в направлении разработки многоволновых фотометров с точной компенсацией влияния атмосферного аэрозоля следует считать разработку метода трехволнового солнечного фотометрирования с двухпараметрической коррекцией [3–6]. Вкратце суть этого метода заключается в следующем.

Измерения проводятся на трех длинах волн  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ , где  $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$ . Физическую основу проводимых измерений составляет закон Бугера-Бера, согласно которому интенсивность солнечного излучения на входе наземного Солнечного фотометра в общем случае  $I(\lambda)$  может быть вычислен по следующему вычислен по следующему выражению

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) e^{-[\tau_{aer}(\lambda) + \tau_r(\lambda) + \tau_g(\lambda)]}, \quad (1)$$

где  $I_0(\lambda)$  — величина солнечного постоянного на длине волны  $\lambda$ ;

$m$  — оптическая воздушная масса;

$\tau_{aer}(\lambda)$  — оптическая толщина аэрозоля;

$\tau_r(\lambda)$  — оптическая толщина релеевского рассеяния;

$\tau_g(\lambda)$  — оптическая толщина поглощения измеряемого газа.

В известном трехволновом методе с двухпараметрической коррекцией [5] вводится на рассмотрение функция промежуточного преобразования, определяемая как

$$z(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \frac{I^{k_1}(\lambda_1) \cdot I^{k_2}(\lambda_3)}{I(\lambda_2)}, \quad (2)$$

где  $k_1, k_2$  — вводимые коэффициенты коррекции.

С учетом того, что  $\tau_r(\lambda)$  можно учесть расчетным путем, а  $\tau_{aer}(\lambda)$  можно представить в виде

$$\tau_{aer}(\lambda) = \tau_{aerf}(\lambda) + \tau_{aerc}(\lambda), \quad (3)$$

где  $\tau_{aerf}(\lambda)$  — оптическая толщина ослабления мелкодисперсного аэрозоля;

$\tau_{aerc}(\lambda)$  — оптическая толщина ослабления крупнодисперсного аэрозоля.

Из выражений (1), (2), (3) нетрудно получить условия компенсации воздействия аэрозоля на результат измерения оптической толщины исследуемого газа на длине волны  $\lambda_2$

$$k_1 \tau_{aerf}(\lambda_1) + k_2 \tau_{aerf}(\lambda_3) = \tau_{aerf}(\lambda_2), \quad (4)$$

$$k_1 \tau_{aerc}(\lambda_1) + k_2 \tau_{aerc}(\lambda_3) = \tau_{aerc}(\lambda_2). \quad (5)$$

Для решения системы уравнения (4) и (5) учитываем известную формулу Ангстрема, которая в первом приближении может быть записана отдельно для крупнодисперсных и мелкодисперсных составляющих:

$$\tau_{aerf} = \beta_{aerf} \cdot \lambda^{-\alpha_f}, \quad (6)$$

$$\tau_{aerc} = \beta_{aerc} \cdot \lambda^{-\alpha_c}, \quad (7)$$

где  $\beta_{aerf}$  и  $\beta_{aerc}$  — коэффициенты аэрозольной мутности соответственно для мелкодисперсного и крупнодисперсного фракций аэрозоля;

$\alpha_f$  и  $\alpha_c$  — показатели Ангстрема, соответственно для мелкодисперсного и крупнодисперсного фракций.

Коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$  вычисляются путем решения системы уравнений (4) и (5) с учетом формул (6) и (7). При этом вычисленные значения  $k_1$  и  $k_2$  оказываются независимыми от  $\beta_{aerf}$  и  $\beta_{aerc}$ , т.е. от любых неструктурных изменений состава общей аэрозольной массы. С учетом вышеуказанного вышеизложенный метод позволяет определить общее количество исследуемого газа  $X$  в виде

$$X = \Phi[k_1, k_2, z, \alpha_f, \alpha_c, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \gamma(\lambda_1), \gamma(\lambda_2), \gamma(\lambda_3)], \quad (8)$$

где  $\gamma(\lambda_i)$  — коэффициент поглощения газа на длине  $\lambda_i$ ,  $i = \overline{1,3}$ .

Таким образом, предложенный в [5] трехволновый метод с двухпараметрической коррекцией позволяет определить общее количество одного исследуемого газа с нейтрализацией влияния наиболее изменчивого параметра атмосферного аэрозоля. Задача увеличения количества измеряемых газов при незначительном увеличении проводимых операций безусловно является актуальной задачей.

### Предлагаемый метод

В настоящей статье предлагается двухступенчатый четырехволновый метод с двухпараметрической коррекцией, в котором количество измеряемых газов увеличивается до двух. Предлагаемый метод алгоритмически может быть изложен в следующем виде [7]:

1. Осуществляются трехволновые фотометрические измерения с двухпараметрической коррекцией на длинах волн  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$ . При этом указанные длины волн выбираются из следующих соображений:

1.1. Длина волны  $\lambda_1$  выбирается так, чтобы на этой длине волны можно было мерить газ  $x_1$  с общим количеством  $X_1$  и атмосферный аэрозоль;

1.2. Длина волны  $\lambda_2$  выбирается так, чтобы на этой длине волны можно было мерить только атмосферный аэрозоль.

1.3. Длина волны  $\lambda_3$  выбирается так, чтобы на этой длине волны можно было мерить газ  $x_2$  с общим количеством  $X_2$  и атмосферный аэрозоль.

Применив вышеизложенный известный трехволновый метод с двухпараметрической коррекцией к выбранным согласно подпунктом 1.1–1.3 длинам волн  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  можно получить следующую линейную комбинацию  $X_1$  и  $X_2$

$$a_1 X_1 + a_2 X_2 = C_1, \quad (9)$$

где  $a_1, a_2$  и  $C_1$  — постоянные величины, определяемые условиями эксперимента и физическими свойствами измеряемых газов и нейтрализуемых фракций аэрозолей.

2. Осуществляются трехволновые фотометрические измерения с двухпараметрических коррекций на длинах волн  $\lambda_1, \lambda_{22}$  и  $\lambda_3$ . При этом длина волны  $\lambda_{22}$  выбирается так, чтобы на этой длине волны можно было мерить только атмосферный аэрозоль.

Применив вышеизложенный известный трехволновый метод с двухпараметрической коррекцией к выбранным длинам волн  $\lambda_1, \lambda_{22}, \lambda_3$  можно получить следующую линейную комбинацию  $X_1$  и  $X_2$

$$a_3 X_1 + a_4 X_2 = C_2, \quad (10)$$

где  $a_3, a_4$  и  $C_2$  — постоянные величины, определяемые условиями эксперимента и физическими свойствами измеряемых газов и нейтрализуемых фракций аэрозолей.

3. При вычисленных значениях  $a_1, a_2, a_3, a_4, C_1$  и  $C_2$  параметры  $X_1$  и  $X_2$  определяются путем решения системы линейных уравнений (9) и (10).

Получим аналитические выражения для коэффициентов  $a$  и  $C$  фигурируемых в уравнениях (9) и (10). Для краткости изложения покажем путь получения аналитических выражений для  $a_1, a_2$  и  $C_1$ .

Уравнение Бугера–Бера для длин волн  $\lambda_1, \lambda_{21}$  и  $\lambda_3$  имеет следующий вид (здесь и далее считаем, что  $m = 1$ )

$$I(\lambda_1) = I_0(\lambda_1) e^{-[\tau_{aer f}(\lambda_1) + \tau_{g1}(\lambda_1) + \tau_{aer A}(\lambda_1)]}, \quad (11)$$

$$I(\lambda_{21}) = I_0(\lambda_{21}) e^{-[\tau_{aer f}(\lambda_{21}) + \tau_{aer A}(\lambda_{21})]}, \quad (12)$$

$$I(\lambda_3) = I_0(\lambda_3) e^{-[\tau_{aer f}(\lambda_3) + \tau_{g2}(\lambda_3) + \tau_{aer A}(\lambda_3)]}, \quad (13)$$

где  $\tau_{g1}(\lambda_1)$  — оптическая толщина первого газа на длине волны  $\lambda_1$ ;

$\tau_{g2}(\lambda_3)$  — оптическая толщина второго газа на длине волны  $\lambda_3$ .

Промежуточная функция преобразования имеет следующий вид

$$z(\lambda_1, \lambda_{21}, \lambda_3) = \frac{I^{k_{11}}(\lambda_1) \cdot I^{k_{21}}(\lambda_3)}{I(\lambda_{21})}. \quad (14)$$

С учетом выражений (11), (12), (13) и (14) получаем следующую систему уравнений для вычисления  $k_1$  и  $k_2$

$$k_{11} \tau_{aer f}(\lambda_1) + k_{21} \tau_{aer f}(\lambda_3) = \tau_{aer f}(\lambda_{21}), \quad (15)$$

$$k_{11} \tau_{aer c}(\lambda_1) + k_{21} \tau_{aer c}(\lambda_3) = \tau_{aer c}(\lambda_{21}). \quad (16)$$

Решение системы (15), (16) с учетом формул (6) и (7) позволяет определить такие значения  $k_{11}$  и  $k_{21}$ , при которых влияние обеих фракций аэрозоля полностью компенсируется. В этом случае из выражений (11), (12), (13) и (14) имеем

$$z(\lambda_1, \lambda_{21}, \lambda_3) = \frac{I_0^{k_{11}}(\lambda_1) \cdot I_0^{k_{21}}(\lambda_3)}{I(\lambda_{21})} \times \exp\left\{-\left[\tau_{g1}(\lambda_1) \cdot k_{11} + \tau_{g2}(\lambda_3) \cdot k_{21}\right]\right\}. \quad (17)$$

Из выражения (17) находим

$$\begin{aligned} & \tau_{g1}(\lambda_1) \cdot k_{11} + \tau_{g2}(\lambda_3) \cdot k_{21} = \\ & = \ln \left[ \frac{I_0^{k_{11}}(\lambda_1) \cdot I_0^{k_{21}}(\lambda_3)}{I_0(\lambda_{21}) \cdot z(\lambda_1, \lambda_{21}, \lambda_3)} \right]. \end{aligned} \quad (18)$$





Если учесть, что оптическая толщина малых газов атмосферы может быть выражена как

$$\tau_{gi} = X_i \cdot \alpha_i(\lambda) \quad (19)$$

то с учетом (18) и (19) окончательно получаем

$$a_1 X_1 + a_2 X_2 = C_1 \quad (20)$$

где

$$a_1 = \alpha_1(\lambda_1) \cdot k_{11}; \quad a_2 = \alpha_2(\lambda_3) \cdot k_{21}, \quad (21)$$

$$C_1 = \ln \left[ \frac{I_0^{k_{11}}(\lambda_1) \cdot I_0^{k_{21}}(\lambda_3)}{I_0(\lambda_{21}) \cdot z(\lambda_1, \lambda_{21}, \lambda_3)} \right]. \quad (22)$$

Повторив все вышеуказанные операции для второго цикла получим линейное уравнение, аналогичное (20)

$$a_3 X_1 + a_4 X_2 = C_2, \quad (23)$$

где

$$a_3 = \alpha_1(\lambda_1) \cdot k_{12}; \quad a_4 = \alpha_2(\lambda_3) \cdot k_{22}, \quad (24)$$

$$C_2 = \ln \left[ \frac{I_0^{k_{12}}(\lambda_1) \cdot I_0^{k_{22}}(\lambda_3)}{I_0(\lambda_{22}) \cdot z(\lambda_1, \lambda_{21}, \lambda_3)} \right]. \quad (25)$$

В выражениях  $k_{12}$  и  $k_{22}$  являются решениями системы линейных уравнений, подобных уравнениям (15) и (16) для второй ступени реализации предлагаемого метода. Совместное решение линейных уравнений (20) и (23) позволяет получить искомые величины  $X_1$  и  $X_2$ .

Отметим, что несмотря на свою двухступенчатость реализации, предложенный метод не предусматривает двойного увеличения объема операций, выполняемых в обычном трехволновом методе с двухпараметрической коррекцией. По сути дела в предлагаемом методе измерения осуществляются на специально подобранных четырех длинах волн, при котором рост количества измеряемых длин волн на одну треть приводит к двукратному увеличению количества измеряемых газов.

Очевидно, что вновь предлагаемые методы и способы должны быть сравнены по эффективности с известными функциональными аналогами и прототипами. Для проведения такого сравнения можно предложить показатель эффективности использования длин волн, определяемый как

$$E = \frac{N_1}{N_2}, \quad (26)$$

где  $N_1$  — количество измеряемых газов;  $N_2$  — количество длин волн на которых осуществляются измерения.

В табл. 1 приведены сравнительные оценки для некоторых типов солнечных фотометров

Таблица 1

Сравнительные оценки некоторых типов солнечных фотометров

| Тип солнечного фотометра                               | $N_1$ | $N_2$ | $E$  |
|--|-------|-------|------|
| Озонометр М121 Гущина                                  | 1     | 2     | 0,5  |
| Спектрофотометр Добсона                                | 1     | 4     | 0,23 |
| Трехволновый фотометр с двухпараметрической коррекцией | 1     | 3     | 0,33 |
| Предложенный в настоящем разделе метод                 | 2     | 4     | 0,5  |

Как видно из данных приведенных в табл. 1 предложенный в настоящем разделе метод солнечного фотометрирования по эффективности превосходит некоторые известные приборы.

Как изложено выше, согласно этому методу выбираются четыре длин волн  $\lambda_1$ ,  $\lambda_{21}$ ,  $\lambda_{22}$  и  $\lambda_3$ , которые должны удовлетворять следующим требованиям:

1. Длина волны  $\lambda_1$  соответствует длине волны поглощения измеряемого первого газа  $x_1$ .
2. Длина волны  $\lambda_3$  соответствует длине волны поглощения измеряемого второго газа  $x_2$ .
3. Длины волн  $\lambda_{21}$  и  $\lambda_{22}$  не должны попадать на какие-либо существенные линии поглощения газов.

#### Экспериментально-модельные исследования

Для экспериментальных исследований, проводимых для проверки работоспособности предлагаемого двухступенчатого четырехволнового метода длины волны  $\lambda_1$ ,  $\lambda_{21}$ ,  $\lambda_{22}$  и  $\lambda_3$  были выбраны следующим образом:  $\lambda_1 = 330$  нм;  $\lambda_{21} = 400$  нм;  $\lambda_{22} = 430$  нм;  $\lambda_3 = 630$  нм.

Измеряемыми газами являются следующие:  $x_1$  — озон ( $O_3$ );  $x_2$  — пары воды ( $H_2O$ ).

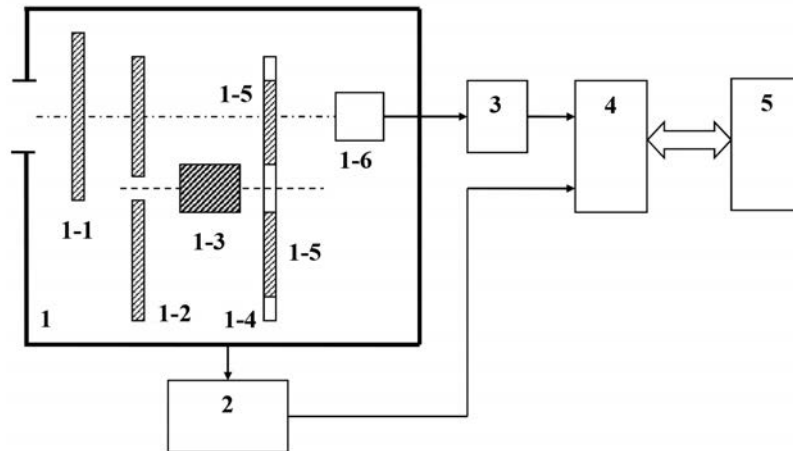
Измерения проводились с помощью лабораторного образца трехволнового солнечного фотометра, разработанного в НИИ Аэрокосмической Информатики в 2007–2008 гг.

Общая функциональная схема трехволнового фотометра показана на рис. 1.

Экспериментальные исследования проводились в двух этапах:

1. Этап 1. Калибровка солнечного фотометра.
2. Этап 2. Проведение измерений по предложенному двухступенчатому четырехволновому методу.

Для калибровки фотометра был использован метод Ленгли, согласно которому для калибровки в качестве базового выражения используется закон Бугера



**Рис. 1.** Функциональная схема солнечного фотометра:

1- оптико-электронная головка; 1-1 — защитный фильтр; 1-2 — лепесток механического модулятора; 1-3 — двигатель постоянного тока; 1-4 — револьверный механизм для вставки интерференционных фильтров в оптическую ось прибора; 1-5 — интерференционные фильтры; 1-6 — фотоэлектрический датчик типа РСК-1; 2 — опорно-поворотное устройство; 3 — согласующий усилитель-формирователь; 4 — интерфейс РС; 5 — персональный компьютер для управления солнечным фотометром

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot \exp[-m \tau_{atm}(\lambda)], \quad (27)$$

Результаты измерений при  $m = 3,0$  приведены в табл. 3

где  $I(\lambda)$  — выходной сигнал фотометра на длине волны  $\lambda$ ;  
 $I_0(\lambda)$  — интенсивность внеатмосферного солнечного излучения на длине волны  $\lambda$ ;

$m$  — оптическая воздушная масса;

$\tau_{atm}(\lambda)$  — оптическая толщина атмосферы на длине волны  $\lambda$ .

Логарифмируя выражение (27) получаем

$$\ln I(\lambda) = \ln I_0(\lambda) - m \tau_{atm}(\lambda). \quad (28)$$

Были проведены измерения величины  $I(\lambda)$  при разных значениях оптической воздушной массы. Результаты измерений при  $m = 1,5$  приведены в табл. 2

*Таблица 2*

Результаты измерений

| Номер измерений  | $I(\lambda); \lambda = 430 \text{ нм [B]}$ |
|------------------|--|
| 1                | 6,95                                       |
| 2                | 6,94                                       |
| 3                | 7,05                                       |
| 4                | 7,01                                       |
| 5                | 6,97                                       |
| 6                | 6,98                                       |
| 7                | 7,06                                       |
| 8                | 7,03                                       |
| 9                | 6,95                                       |
| 10               | 6,98                                       |
| Среднее значение | 7,01                                       |

*Таблица 3*

| Номер измерений  | $I(\lambda); \lambda = 430 \text{ нм [B]}$ |
|------------------|--|
| 1                | 3,96                                       |
| 2                | 3,99                                       |
| 3                | 4,02                                       |
| 4                | 4,01                                       |
| 5                | 4,04                                       |
| 6                | 3,98                                       |
| 7                | 4,01                                       |
| 8                | 4,03                                       |
| 9                | 3,99                                       |
| 10               | 3,99                                       |
| Среднее значение | 4,02                                       |

Построенная диаграмма показана на рис. 2.

Согласно методу Ленгли следует осуществить следующие операции:

1. Осуществить измерения при двух значениях оптической воздушной массы при известной величине оптической толщины атмосферы на выбранной длине волны.

2. Построить диаграмму Ленгли, обозначив точки А ( $m = 1,5; I(\lambda) = 7$ ) и В ( $m = 3,0; I(\lambda) = 4$ ).

3. Объединить точки А и В прямой линией и экстраполируя эту линию, графически найти точку С — точку пересечения оси ординат с линией АВ.

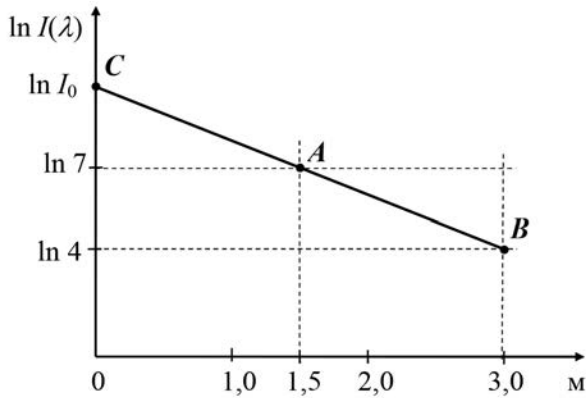


Рис. 2. Построенная диаграмма Ленгли

4. Определить числовое значение  $I_0(\lambda)$  на выходе фотометра.

Выполним вышеуказанные пункты.

Уравнение линии АВ имеет следующий вид

$$\ln I_0 - \ln 4 = k(0 - 3). \quad (29)$$

В уравнении коэффициент  $k$  вычисляется как

$$k = \frac{\ln 7 - \ln 4}{1,5 - 3} = -\frac{\ln 7/4}{1,5}. \quad (30)$$

С учетом (29) и (30) получаем

$$\ln I_0 - \ln 4 = \frac{3 \ln(7/4)}{1,5}. \quad (31)$$

Из выражения (31) получаем

$$\begin{aligned} \ln I_0 &= 2 \ln\left(\frac{7}{4}\right) + \ln 4 = \\ &= \ln\left(\frac{7}{4}\right)^2 + \ln 4 = \ln\left(\frac{7^2}{4}\right). \end{aligned} \quad (32)$$

Следовательно, имеем

$$I_0 = \frac{49}{4} = 12,25.$$

Таким образом, найдено числовое значение Солнечной постоянной на  $\lambda = 430$  нм на выходе фотометра.

Для измерений на длине волны  $\lambda = 430$  нм может быть использована следующая формула, применительно к используемому образцу фотометра

$$I(430) = 12,25 e^{-m\tau_{ам}(430)}. \quad (33)$$

Аналогичным образом была осуществлена калибровка лабораторного образца фотометра на длинах волн  $\lambda = 330, 400$  и  $630$  нм. Соответственно получены следующие выражения, аналогичные для указанных длин волн

$$\begin{aligned} I(330) &= 1,2 \cdot e^{-m\tau_{ам}(330)}, \\ I(400) &= 10,6 \cdot e^{-m\tau_{ам}(400)}, \\ I(630) &= 4,7 \cdot e^{-m\tau_{ам}(630)}. \end{aligned} \quad (34)$$

Измеренные средние значения  $I(330); I(400); I(430); I(630)$  приведены в табл. 4. Измерения проводились при  $m = 2$ .

Таблица 4

Измеренные средние значения  
 $I(330); I(400); I(430); I(630)$

| $I(330)$ | $I(400)$ | $I(430)$ | $I(630)$ |
|----------|----------|----------|----------|
| 0,11 В   | 3,98 В   | 5,97 В   | 0,245 В  |

Вычислим корректирующие коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$  для первой тройки длин волн (330, 400 и 630 нм). Для этой цели воспользуемся формулой вычисления функции промежуточного преобразования

$$z = \frac{I^{k_1}(\lambda_1) \cdot I^{k_2}(\lambda_3)}{I(\lambda_2)}. \quad (35)$$

С учетом данных табл. 4 и результатов калибровки каналов получаем следующие выражения

$$\begin{aligned} 0,11 &= 1,2 \exp\{-2[\tau_{oz}(330) + \tau_{aer}(330)]\}, \\ 4 &= 10,6 \exp[-2 \cdot \tau_{aer}(400)], \\ 6 &= 12,25 \exp[-2 \cdot \tau_{aer}(430)], \\ 0,245 &= 4,7 \exp\{-2[\tau_{H_2O}(630) + \tau_{aer}(630)]\}. \end{aligned} \quad (36)$$

Для первой тройки длин волн имеем

$$\begin{aligned} z_1 &= \frac{I^{k_1}(330) \cdot I^{k_2}(630)}{I(400)} = \frac{1,2^{k_1} \cdot 4,7^{k_2}}{10,6} \times \\ &\times \exp\{-m[k_1(\tau_{oz}(330) + \tau_{aer}(330))] + \\ &+ k_2[\tau_{H_2O}(630) + \tau_{aer}(630) - \tau_{aer}(400)]\}. \end{aligned} \quad (37)$$

Условия исключения влияния аэрозоля следующие

$$\begin{aligned} k_1\tau_c(330) + k_2\tau_c(630) &= \tau_c(400), \\ k_1\tau_f(330) + k_2\tau_f(630) &= \tau_f(400), \end{aligned} \quad (38)$$

где  $\tau_c$  и  $\tau_f$ , соответственно, оптические толщины крупнодисперсного и мелкодисперсного фракционных составляющих аэрозоля.

Для решения системы уравнения (38) воспользуемся формулой Ангстрема

$$\begin{aligned} \tau_c &= \beta_c \lambda^{-\alpha_c}, \\ \tau_f &= \beta_f \lambda^{-\alpha_f}, \end{aligned} \quad (39)$$

где  $\beta_c$  и  $\beta_f$  — соответственно коэффициенты аэрозольной мутности Ангстрема для крупнодисперсного и мелкодисперсного составляющего.

С учетом уравнений (39) система уравнений (38) принимает следующий вид

$$\begin{cases} \lambda_{330}^{-\alpha_c} \cdot k_1 + \lambda_{630}^{-\alpha_c} \cdot k_2 = \lambda_{400}^{-\alpha_c}, \\ \lambda_{330}^{-\alpha_f} \cdot k_1 + \lambda_{630}^{-\alpha_f} \cdot k_2 = \lambda_{400}^{-\alpha_f}. \end{cases} \quad (40)$$

В целях экспериментально-модельных исследований примем  $\alpha_c = 0$ ;  $\alpha_a = 0$  [8, 9]. В этом случае система уравнений (28) принимает следующий вид

$$\begin{aligned} k_1 + k_2 &= 1, \\ \frac{k_1}{0,33} + \frac{k_2}{0,63} &= \frac{1}{0,4}. \end{aligned} \quad (41)$$

Решение системы (41) дало

$$k_1 = 0,709; k_2 = 0,291.$$

С учетом данных табл. 4 и вычисленных величин  $k_1$  и  $k_2$  вычисленная величина  $z_1$  составила 0,07.

Из выражения (37) получаем

$$\begin{aligned} 0,709 \tau_{oz} (330) + 0,291 \tau_{H_2O} (630) &= \\ = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{1,2^{0,709} \cdot 4,7^{0,291}}{0,07 \cdot 10,6} \right) &= 0,5928. \end{aligned} \quad (42)$$

Рассмотрим данные по второй тройке длин волн (330, 430, 630 нм). По аналогии с выражением (37) имеем

$$\begin{aligned} z_2 &= \frac{I^{k_1} (330) \cdot I^{k_2} (630)}{I(430)} = \frac{1,2^{k_1} \cdot 4,7^{k_2}}{12,25} \times \\ &\times \exp \left\{ -m \left[ k_1 \left( \tau_{oz} (330) + \tau_{aer} (330) \right) \right] + \right. \\ &\left. + k_2 \left[ \tau_{H_2O} (630) + \tau_{aer} (630) - \tau_{aer} (430) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (43)$$

Условия исключения влияния аэрозоля имеют следующий вид

$$\begin{aligned} k_1' \tau_c (330) + k_2' \tau_c (630) &= \tau_c (430), \\ k_1' \tau_f (330) + k_2' \tau_f (630) &= \tau_f (430). \end{aligned} \quad (44)$$

С учетом формул (39) система уравнений (44) принимает следующий вид

$$\begin{cases} \lambda_{330}^{-\alpha_c} \cdot k_1' + \lambda_{630}^{-\alpha_c} \cdot k_2' = \lambda_{430}^{-\alpha_c}, \\ \lambda_{330}^{-\alpha_f} \cdot k_1' + \lambda_{630}^{-\alpha_f} \cdot k_2' = \lambda_{430}^{-\alpha_f}. \end{cases} \quad (45)$$

Для упрощения расчетов примем  $\alpha_c = 0$ ;  $\alpha_f = 1$ . В этом случае система уравнений (45) принимает следующий вид

$$\begin{aligned} k_1' + k_2' &= 1, \\ \frac{k_1'}{0,33} + \frac{k_2'}{0,63} &= \frac{1}{0,43}. \end{aligned} \quad (46)$$

Решение системы уравнений (46) дает  $k_1' = 0,61$ ;  $k_2' = 0,39$ . Вычисленное значение  $z_2$  для второй тройки длин волн, с учетом данных табл. 5 и значений  $k_1'$  и  $k_2'$  составило 0,05. В этом случае из выражения (46) нетрудно получить следующее уравнение

$$\begin{aligned} 0,61 \tau_{oz} (330) + 0,39 \tau_{H_2O} (630) &= \\ = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{1,2^{0,61} \cdot 4,7^{0,39}}{0,05 \cdot 12,25} \right) &= 0,7991. \end{aligned} \quad (47)$$

Таким образом, выражения (42) и (47) составляют систему уравнений, решение которых позволяет вычислить оптические толщины озона и водяных паров с полной нейтрализацией влияния аэрозоля.

Решение системы уравнений (42) и (47) дало  $\tau_{oz} = 0,018$ ;  $\tau_{H_2O} = 2$ . С учетом  $\tau_{H_2O} = a \cdot m \cdot W$ , где  $a = 0,5$  имеем  $W = \tau_{H_2O}$ , где  $W$  — общее количество паров воды, см.

С учетом известного выражения  $\tau_{oz} = \alpha(\lambda) \cdot X$ , где  $\alpha(\lambda)$  — коэффициент поглощения озона,  $\alpha(330 \text{ нм}) = 0,06 \text{ см}^{-1}$ ;  $X$  — общее содержание озона, имеем

$$X = \frac{\tau_{oz}}{\alpha(\lambda)} = \frac{0,018}{0,06} = 0,3 \text{ см}.$$

### Заключение

В настоящей статье показано, что актуальная задача исключения влияния атмосферного аэрозоля на результат проводимых измерений атмосферных малых газов может быть эффективно решена путем реализации двухступенчатого варианта известного трехволнового измерителя. В то время как известный трехволновый метод с двухпараметрической коррекцией позволяет определить общее количество одного исследуемого газа с нейтрализацией влияния аэрозоля, то в предложенном методе количество измеряемых газов



увеличивается до двух. Увеличения количества измеряемых газов при незначительном увеличении проводимых операций безусловно повышает эффективность проводимых измерительных работ по исследованию атмосферных газов. В результате проводимых экспериментально-модельных исследований четырех волнового двухступенчатого метода получены следующие оценки общего количества паров воды и озона:  $W = 2$  см;  $X = 0,3$  см. Эти данные неплохо согласуются с известными данными по Азербайджану, согласно которым средние значения  $W$  и  $X$  составляют  $2-3$  см<sup>1</sup> и  $0,3-0,33$  см<sup>2</sup> [10–13] соответственно.

### Литература

1. Гуцин Г.П., Виноградова Н.Н. Суммарный озон в атмосфере. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 239 с.
2. Fuller K., Kreidenweis S. Modeled Aerosol Optical Properties from Measurement-Based Mixtures of Chemical Species: Assessing the impacts of Particle Morphology and absorption. Summary of Research // Internet Archive. URL: [https://archive.org/details/NASA\\_NTRS\\_Archive\\_20020039335/page/n1/mode/2up](https://archive.org/details/NASA_NTRS_Archive_20020039335/page/n1/mode/2up) (дата обращения 15.04.2020).
3. Асадов Х.Г., Исаев А.А. Общая теория трехволновых озонметрических измерений // Измерительная техника. 2005. № 8. С. 66–68.
4. Асадов Х.Г., Сулейманов Ш.Т. Синтез трехволновых скорректированных измерителей малых компонент атмосферы в ультрафиолетовом диапазоне // Метрология. 2007. № 9. С. 3–9.
5. Асадов Х.Г., Ибрагимов Э.А., Джавадов Н.Г., Гашимов Дж.Г. Двухступенчатый трехволновый метод построения двухпараметрической коррекции // Альтернативная энергетика и экология. 2011. № 4. С. 70–73.
6. Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y., Nakajima T., Lavenu F., Jankowiak I., Smirnov A. AERONET — A federated instrument network and data archive for aerosol characterization // Rem. Sens. Environ. 1998. No. 66. Pp. 1–16.
7. Eck T.F., Holben B.N., Reid J.S., Dubovik O., Smirnov A., O'Neill N.T., Slutsker I., Kinne S. Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban and desert dust aerosols // J. Geophys. Res. 1999. Vol. 104. D24. Pp. 31 333–31 350.
8. Heintzenberg J., Raes F., Schwartz S. Tropospheric aerosols // Atmospheric Chemistry in a Changing World. Global Change — The IGBP Series. Springer, Berlin, Heidelberg, 2003. Pp 125–156.
9. Zheng Y., Lin J., Wu R., Li Z., Wang B., Tamio T. Seasonal statistical characteristics of aerosol optical properties at a site near a dust region in China // Journal of geophysical research. 2008. Vol. 113 D16205. Pp. 1–11.
10. Euroskyrad. European Skynet Radiometers network. URL: <http://www.euroskyrad.net/objectives.html> (дата обращения 15.04.2020).
11. Hood L.L., McCormack J.P., Labitzke K. An investigation of dynamical contributions to mid-latitude ozone trends in contributions to mid-latitude ozone trends in winter // J. Geophys. Res. 1997. Vol. 102. No. D11. Pp. 13,079–13,093.
12. Rowland F.S. Stratospheric ozone depletion // Ann. Rev. Phys. Chem. 1991. No. 42. Pp. 731–741.
13. Reinsel G.C., Tiao G.C., Wuebbles D.J., Kerr J.B., Miller A.J., Nagatani R.M., Bishop L., Ying L.H. Seasonal trend analysis of published ground-based and TOMS total ozone data through 1991 // J. Geophys. Res. 1994. No. 99. Pp. 5449–5464.

<sup>1</sup>Карта распределения водяных паров над Европой, составленная по данными ATOVS (спутник NOAA 14/16). ESR. European SkyRad users network. Background  
<sup>2</sup>Global ozone maps. URL: [http://exp\\_studies.tor.ec.gc.ca/e/ozone/Curr/almap\\_ghgm](http://exp_studies.tor.ec.gc.ca/e/ozone/Curr/almap_ghgm) (дата обращения 15.04.2020)

## TWO STAGES FOUR WAVELENGTHS METHOD FOR MEASURING TWO GAS COMPONENTS OF ATMOSPHERE USING SUN PHOTOMETER WITH TWO PARAMETRIC AEROSOL CORRECTION

**HIKMAT H. ASADOV**

Baku, Azerbaijan, asadzade@rambler.ru

**SEVINJ N. ABDULLAYEVA**

Baku, Azerbaijan, abdullayevasn@rambler.ru

**FUAD F. AGAYEV**

Baku, Azerbaijan

**KEYWORDS:** photometer; aerosol; low gases; calibration; measurements.

### ABSTRACT

The latest achievements in development of multiwavelength photometry in direction of increase of number of channels and spectral resolution are hyper-spectrometers and differential optical absorption spectrometers. In these devices the mechanism of formation of multi number wave channels is almost identical and neutralization of

aerosol effect is carried out using such methods as averaging, integration etc don't accounting differences in wavelength dependence of optical depth of aerosol fractions. It is noted that in high precision sun photometry the high accuracy separate accounting of each aerosol fraction is necessary. The reason for that is at least following

factors: multifractionality of atmospheric aerosol, taking into account that wavelength dependences of these fractions differ each-other. The factual differences between sources of aerosol that is the generated by them aerosol has different physical-chemical properties. In the paper two-stages four wavelengths method with two parametric correction is suggested where number of measured gases is increased twofold. Despite its two stage construction the suggested method doesn't require twofold increase of volume of operations carried out in known three wavelength method with double parametric corrections. The matter of novelty is that in suggested method the measurements are carried out at specially selected four wavelengths upon which increase of number of wavelengths by one-third leads to twofold increase of number of measured gases. As a result of carried out experimental-model researches of four wavelengths two stage method following estimates of total amount of water vapors ( $W$ ) and ozone ( $X$ ) are derived:  $W = 2$  cm and  $X = 0,3$  cm. Such an estimates well accord with known data on Azerbaijan in line with mean values of  $W$  and  $X$  are 2-3 cm and 0,3-0,33 cm.

#### REFERENCES

1. Gushhin G.P., Vinogradova N.N. *Summary ozon v atmosphere* [Symmarnyy ozon v atmosfere]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983. 239 p. (In Rus)
2. Fuller K., Kreidenweis S. Modeled Aerosol Optical Properties from Measurement-Based Mixtures of Chemical Species: Assessing the impacts of Particle Morphology and absorption. Summary of Research. *Internet Archive*. URL: [https://archive.org/details/NASA\\_NTRS\\_Archive\\_20020039335/page/n1/mode/2up](https://archive.org/details/NASA_NTRS_Archive_20020039335/page/n1/mode/2up) (date of access 15.04.2020).
3. Asadov H.G., Isaev A.A. Obshhaja teorija trehvolnovykh ozonometricheskikh izmerenij [General theory of three-wave ozonometric measurements]. *Izmeritel'naja tehnika*. 2005. No. 8. Pp. 66-68. (In Rus)
4. Asadov H.G., Sulejmanov Sh.T. Sintez trehvolnovykh skorrektirovannykh izmeritelej malyh komponent atmosfery v ul'trafioletovom diapazone [Synthesis of three-wave corrected meters of small atmospheric components in the ultraviolet range]. *Metrologiya*. 2007. No. 9. Pp. 3-9. (In Rus)
5. Asadov H.G., Ibrahimov E.A., Javadov N.H., Hashimov J.H. Two stages three-wavelength method for development of sun photometer with

- two-parametric correction. *Alternativnaya Energetika i Ekologiya* [Alternative energy and ecology]. 2011. No. 4. Pp. 70-73. (In Rus)
6. Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y., Nakajima T., Lavenu F., Jankowiak I., Smirnov A. AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Rem. Sens. Environ.* 1998. No. 66. Pp. 1-16.
7. Eck T.F., Holben B.N., Reid J.S., Dubovik O., Smirnov A., O'Neill N.T., Slutsker I., Kinne S. Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban and desert dust aerosols. *J. Geophys. Res.* 1999. Vol. 104. D24. Pp. 31333-31350.
8. Heintzenberg J., Raes F., Schwartz S. et al. Tropospheric aerosols. *Atmospheric Chemistry in a Changing World. Global Change – The IGBP Series*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2003. Pp 125-156.
9. Zheng Y., Lin J., Wu R., Li Z., Wang B., Tamio T. Seasonal statistical characteristics of aerosol optical properties at a site near a dust region in China. *Journal of geophysical research*. 2008. Vol. 113. D16205. Pp. 1-11.
10. Euroskyrad. European Skynet Radiometers network. URL: <http://www.euroskyrad.net/objectives.html> (date of access 15.04.2020).
11. Hood L.L., McCormack J.P., Labitzke K. An investigation of dynamical contributions to mid-latitude ozone trends in contributions to mid-latitude ozone trends in winter. *J. Geophys. Res.* 1997. Vol. 102. No. D11. Pp. 13,079-13,093.
12. Rowland F.S. Stratospheric ozone depletion. *Ann. Rev. Phys. Chem.* 1991. No. 42. Pp. 731-741.
13. Reinsel G.C., Tiao G.C., Wuebbles D.J., Kerr J.B., Miller A.J., Nagatani R.M., Bishop L., Ying L.H. Seasonal trend analysis of published ground-based and TOMS total ozone data through 1991. *J. Geophys. Res.* 1994. No. 99. Pp. 5449-5464.

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Asadov H.H., PhD, Full Professor, Head of department of Research Institute of Aerospace Informatics of National Aerospace Agency; Abdullayeva S.N., PhD, Docent, Assistant professor of Azerbaijan State University of Oil and Industry; Agayev F.F., postgraduate student of of National Aerospace Agency.

**For citation:** Asadov H.H., Abdullayeva S.N., Agayev F.F. Two stages four wavelengths method for measuring two gas components of atmosphere using sun photometer with two parametric aerosol correction. *H&ES Research*. 2020. Vol. 12. No. 4. Pp. 6-14. doi: 10.36724/2409-5419-2020-12-4-6-14 (In Rus)



doi: 10.36724/2409-5419-2020-12-4-15-22

# ОБНАРУЖЕНИЕ И СОПРОВОЖДЕНИЕ ВЫСОКООРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМА МНОГООБЗОРНОГО НАБЛЮДЕНИЯ

**СИЛАНТЬЕВ**  
**Александр Борисович**<sup>1</sup>

**БАБКИН**  
**Юрий Владимирович**<sup>2</sup>

**ТИМОШЕНКО**  
**Александр Васильевич**<sup>3</sup>

**ЯКУБОВСКИЙ**  
**Сергей Владимирович**<sup>4</sup>

## АННОТАЦИЯ

По результатам проведенных исследований выявлено, что оперативное уточнение каталога контроля космического пространства высокоточными данными о параметрах орбит высокоорбитальных космических объектов может быть обеспечено с помощью радиолокационных станций дальнего обнаружения. Повышение характеристик обнаружения радиолокационных станций дальнего обнаружения при работе по малозаметным высокоорбитальным космическим объектам возможно за счет наращивания потенциала станции или увеличения продолжительности наблюдения, причем увеличение потенциала напрямую связано с созданием новых мощных энергозатратных радиолокаторов. Установлено, что увеличение времени наблюдения возможно без значительных материальных затрат и сводится к разработке и реализации методов продолжительного (многообзорного) наблюдения, получивших в современной технической литературе название «track-before-detect» (TBD) или «сопровождение до обнаружения». При их использовании решение о наличии цели не выносится в каждом отдельно взятом обзоре, а для обнаружения движущихся объектов используются алгоритмы обнаружения-сопровождения. Обоснована принципиальная возможность расширения зоны действия радиолокационных станций дальнего обнаружения при обнаружении и измерении параметров траектории высокоорбитальных космических объектов за счет совместной обработки результатов нескольких зондирований. Предложен алгоритм обнаружения и сопровождения высокоорбитальных космических объектов, основанный на некогерентном накоплении сигнальной информации нескольких зондирований с последующим преобразованием информации в параметрическое пространство, поиске и оценке параметров их траекторий. Отмечено, что применение такого алгоритма не приводит к необходимости увеличения энергетического потенциала радиолокационных станций. Показаны недостатки, препятствующие реализации алгоритма в качестве основного, и возможность его применения в качестве дополнительного в тракте обработки радиолокационной информации. Проанализировано качество получаемой в ходе многообзорного наблюдения траекторной информации. Установлено, что при использовании методов многообзорного наблюдения блочного типа необходимое качество предварительной оценки параметров траектории обеспечивается за счет одновременной обработки совокупности измерений (замеров). При этом дополнительным источником ошибок может быть вероятностный характер отбора отметок обнаруженной траектории для последующей оценки её параметров.

## Сведения об авторах:

<sup>1</sup>к.т.н., доцент, профессор Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны, г. Ярославль, Россия, a.silantev@uniyar.ac.ru

<sup>2</sup>Ведущий инженер АО «Радиотехнический институт имени академика А.Л.Минца», г. Москва, Россия, YuVIBabkin@yandex.ru

<sup>3</sup>д.т.н., профессор, начальник комплексного отдела – заместитель генерального конструктора АО «Радиотехнический институт имени академика А.Л.Минца»; начальник лаборатории Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники», г. Москва, Россия, atimoshenko@rti-mints.ru

<sup>4</sup>д.т.н., доцент, начальник отдела Научно-исследовательского испытательного центра Центрального научно-исследовательского института войск воздушно-космической обороны Министерства Обороны Российской Федерации, г. Москва, Россия, syakubovskiy@mail.ru

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** околоземное космическое пространство; высокоорбитальный космический объект; искусственный спутник Земли; радиолокация, радиолокационная станция; система контроля космического пространства; мониторинг околоземного пространства.

**Для цитирования:** Силантьев А. Б., Бабкин Ю. В., Тимошенко А. В., Якубовский С. В. Обнаружение и сопровождение высокоорбитальных космических объектов с использованием алгоритма многообзорного наблюдения // Научно-технические исследования в космических исследованиях Земли. 2020. Т. 12. № 4. С. 15–22. doi: 10.36724/2409-5419-2020-12-4-15-22

## Введение

Главной проблемой космической деятельности человека в околоземном космическом пространстве в ближайшей перспективе становится проблема перенаселения космического пространства (ОКП) техногенными объектами — как действующими искусственными спутниками Земли (ИСЗ), так уже вышедшими из строя аппаратами, оставшимися на околоземных орбитах технологическими фрагментами — последними ступенями ракет-носителей, фрагментами разрушения спутников и прочим. Главная опасность перенаселения ОКП состоит в угрозе действующим и будущим космическим миссиям. По этой причине одной из важнейших задач для обеспечения безопасной деятельности человечества в космосе является постоянный мониторинг и каталогизация техногенных объектов, а так же отслеживание следующих событий в околоземном космическом пространстве:

- вывод на околоземную орбиту новых космических аппаратов (КА);
- проведение орбитальных манёвров существующими КА;
- угроза столкновения действующих КА с другими аппаратами, либо с фрагментами космического мусора;
- сход с орбиты КА;
- разрушение космических объектов с образованием множества фрагментов космического мусора, представляющих угрозу столкновения с действующими КА.

В настоящее время, благодаря достаточному количеству средств наблюдения, на требуемом уровне обеспечивается поддержание каталога только для низкоорбитальных космических объектов (НОКО). Основными средствами наблюдения за НОКО являются радиолокационные станции дальнего обнаружения (РЛС ДО). РЛС ДО осуществляют постоянный поиск и определение параметров орбит космических объектов на высотах до нескольких тысяч километров. Однако, для космических объектов, относящихся к классу так называемых высокоорбитальных (ВОКО) — с удалением от поверхности Земли более 2500 километров [1] — возможности существующей группировки информационных средств для эффективного мониторинга космического пространства крайне ограничены.

В высокоорбитальных областях околоземного космического пространства функционируют:

- навигационные системы;
- системы космической радио- и радиотехнической разведки;
- системы связи;
- системы сбора и передачи разведывательных данных;
- системы обнаружения старата баллистических ракет.

Процесс контроля ВОКО осложняется отсутствием достаточного количества средств наблюдения. Кроме того, трудоёмкость процесса контроля ВОКО, труднодоступность и дефицит измерений по объектам, высокие энергетические затраты наблюдений ВОКО, обуславливаются:

- периодическими коррекциями орбит действующих космических аппаратов;
- фактором малой мерной дуги (обусловлен медленным угловым движением ВОКО, необходимостью длительных сеансов наблюдения для более точного определения орбитальных параметров);
- большим объёмом области пространства высоких орбит по сравнению с низкими;
- уменьшением уровня полезного сигнала при увеличении расстояния до наблюдаемого объекта;
- ограниченной производительностью наблюдательных средств в целом.

Одним из вариантов создания дополнительного источника оперативных и точных данных по ВОКО могло бы стать совершенствование режимов функционирования РЛС ДО метрового диапазона, чья дальность наблюдения в штатном режиме из-за ограниченности энергетики РЛС и влияния эффекта дифракции радиоволн ограничена 4000–6000 км.

Известно два метода повышения характеристик обнаружения РЛС при работе по таким малозаметным объектам, как ВОКО — либо за счет наращивания потенциала РЛС ДО, либо путем увеличения продолжительности наблюдения.

Если наращивание потенциала связано с фактически созданием новых мощных энергозатратных радиолокаторов, то вариант увеличения времени наблюдения возможен без значительных затрат и сводится к разработке и реализации методов так называемого многообзорного наблюдения.

Такие методы обладают потенциальными возможностями осуществлять не только сбор и обработку траекторных и нетраекторных измерений, но и обеспечивают уточнение орбит каталогизированных объектов, а также обнаружение новых КА. Реализация этих методов возможна в штатном режиме работы РЛС ДО, в качестве которого в дальнейшем будем рассматривать непрерывный обзор некоторых «барьерных зон», а также обнаружение, сопровождение, определение и сброс с сопровождения траекторий КО. Алгоритм работы РЛС ДО по космическим объектам включает: излучение в эфир и последующие когерентное (некогерентное) накопление пачки сигналов для получения координат (R, u, v, R1) единичной опорной точки траектории движения объекта, дальнейшую совместную обработку информации нескольких опорных точек для получения траектории объектов [2, 4].



При реализации режима многообзорного наблюдения осуществляется совместная обработка информации нескольких обзоров пространства. По результатам обработки происходит обнаружение цели (траектории объекта) и формируется практически полноценный вектор координатной информации ( $R, u, v, R1, u1, v1$ ).

**Метод многообзорного некогерентного накопления**

В работах [6–10] достаточно подробно описаны методы многообзорного наблюдения, получившие широкую известность в конце 90-х годов прошлого века. Реализующие их алгоритмы, в которых решение о наличии цели не выносится в каждом отдельно взятом обзоре, а для обнаружения движущихся объектов используются совместно алгоритмы накопления и сопровождения, получили название «сопровождение до обнаружения» или TBD (track-before-detect). В опубликованном цикле статей [6] рассмотрены вопросы реализации алгоритмов TBD и про-

анализирована потенциальная эффективность метода на основе известного преобразования Хафа.

Известно [13], что методы «обнаружения-сопровождения», как и процедуры завязки трасс (обнаружения траекторий), могут быть как блочного типа, так и реализованы на основе процедур динамического программирования (ДП). Метод, использующий ДП [9,10], заключается в анализе на каждом обзоре всех элементов разрешения, в которых может находиться цель, и выборе только одного из них максимальной амплитудой принятого сигнала. Затем происходит накопление информации и сравнение полученной суммы с порогом для принятия решения о наличии траектории цели.

Приведенные выше методы позволяют, как правило, обнаруживать участки (чаще всего прямолинейные) траекторий движения объектов локации. Один из вычислительно эффективных методов реализации многообзорного наблюдения основан на использовании параметрического преобразования Хафа [6]. Блок-схема алгоритма, реализующего метод многообзорного наблюдения, представлена на рис. 1.

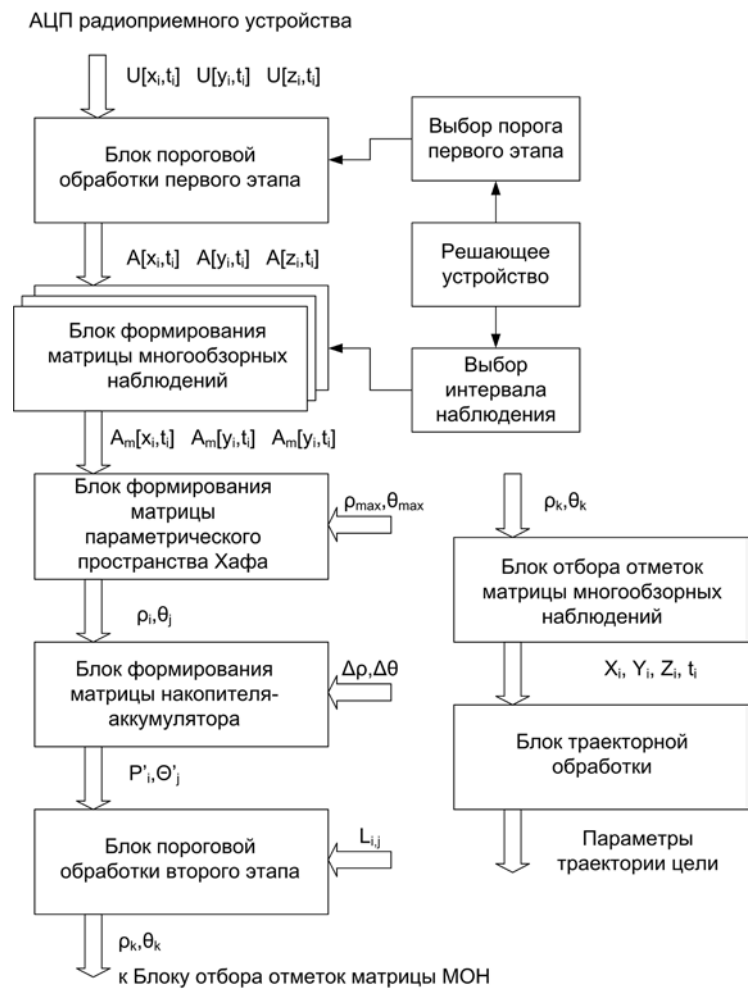


Рис. 1. Блок-схема алгоритма обнаружения на основе преобразования Хафа

Особенности реализации метода блочного типа на основе преобразования Хафа подробно исследованы в [6–8]. В этих и ряде других работ отмечены также недостатки методов TBD, препятствующие их широкой реализации в современных РЛС в качестве основных методов обнаружения и завязки трасс целей. В ходе дальнейших исследований было предложено применение методов многообзорного наблюдения в дополнительном канале обработки радиолокационной информации [11], и проанализирована эффективность методов, связанная также с предварительным получением траекторной информации [12].

Основными операциями представленного на (см.рис. 1) алгоритма являются:

1. Перевод координат точек матрицы многообзорных наблюдений, превысивших порог обнаружения первого этапа в параметрическое пространство [6]. При этом границы параметрического пространства вычисляются исходя из максимальных и минимальных дальностей обнаруживаемых целей (для определенной области исследуемого пространства).

2. Отбор точек, вероятностно принадлежащих траектории обнаруживаемой цели. К содержимому ячеек параметрического пространства  $(\rho_i, \theta_i)$  добавляются новые значения, вычисленные для очередной точки предполагаемой траектории. Таким образом, формируется массив, называемый аккумулятором.

3. Пороговая обработка содержимого массива аккумулятора, решение об обнаружении траектории цели. Порог второго этапа устанавливается исходя из требуемой (допустимой) частоты (вероятности) ложно обнаруживаемых траекторий.

4. Отбор отметок из буфера матрицы многообзорных наблюдений для дальнейшей траекторной обработки, определение параметров обнаруженной траектории.

Эффективность режима многообзорного наблюдения в значительной мере определяется в результате решения следующих вопросов:

1. Определение порога первого этапа алгоритма, исходя из необходимого уровня сигналов обнаруживаемых целей и допустимой вероятности ложных тревог, с учетом объема выделяемой памяти существующих вычислительных средств.

2. Обоснование и выбор числа одновременно анализируемых обзоров пространства РЛС ДО с учетом необходимой эффективности метода и объема выделяемой памяти существующих вычислительных средств.

3. Анализ возможностей реализации метода с учетом ограничений объема памяти и производительности существующих вычислительных средств.

Таким образом, для реализации многообзорного некогерентного накопления необходимо просуммировать последетекторные сигналы из элементов дальности, пред-

положительно принадлежащих траектории одной цели. Эффективность многообзорного накопления практически совпадает с эффективностью известного метода межпериодного некогерентного накопления [14] и определяется характером межобзорных флуктуаций эхо-сигналов цели, которые чаще всего имеют независимый характер. При этом количество проверяемых потенциальных трасс быстро нарастает.

Эффективность методов многообзорного наблюдения обычно связывают с увеличением вероятности или расширением рубежей обнаружения и завязки траекторий малоразмерных и слабоотражающих целей [6,7]. Подобная оценка эффективности представляется не полной, так как радиолокационная станция или отдельный алгоритм в составе тракта обработки, реализующие эти методы, одновременно с фактом обнаружения траектории дополнительно решает задачу получения траекторной информации. Закономерно возникает вопрос о качестве такой траекторной информации. Представляется важным оценить этот косвенный выигрыш от применения методов многообзорного наблюдения, заключающийся в раннем получении траекторной информации.

Методы завязки траекторий и оценивания траекторных параметров условно разделяются на два класса: последовательные и блочные<sup>1</sup>. В методах последовательного типа результирующая оценка траектории может уточняться по мере поступления новых отметок от цели. Блочные методы, в отличие от последовательных, обрабатывая одновременно совокупность отметок, призваны обеспечить одномоментно более высокое качество оценки траекторной информации. В этой связи представляет интерес сравнительный анализ точности известного последовательного метода измерения координат и параметров траектории, а также алгоритма многообзорного наблюдения блочного типа.

В современных системах сопровождения целей чаще всего применяются алгоритмы последовательного типа<sup>2</sup>. С учетом ожидаемого линейного закона изменения оцениваемых параметров для измерений применяют, как правило, широко известный  $\alpha$ - $\beta$  фильтр<sup>2</sup>. Общая теория подобных измерений достаточно хорошо разработана, возникающие при этом частные задачи подробно исследованы [9,13–15].

В ходе многократных измерений (режим слежения) результирующая дисперсия будет уменьшаться по мере накопления данных измерений [9]

<sup>1</sup>Коновалов А.А. Основы траекторной обработки радиолокационной информации: в 2 ч. СПб. Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. Ч.1. 164 с.

<sup>2</sup>Информационные технологии в радиотехнических системах: Учебное пособие / В.А. Васин, И.Б. Власов, Ю.М. Егоров и др.; Под ред. И.Б. Федорова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 672с.



$$\frac{1}{\sigma_{k+1}^2} = \frac{1}{(\sigma_k^2 + \sigma_{\mu k}^2)} + \frac{1}{\sigma_{y(k+1)}^2}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{y k}^2 = \sigma_y^2$  — дисперсия текущего измерения дальности (измерения полагают равноточными, пренебрегая несущественными от измерения к измерению изменениями отношения сигнал-шум  $q^2$ );

$\sigma_{\mu k}^2$  — дисперсия случайного маневра цели для гауссовско-марковской модели.

Установившееся значение дисперсии результирующего измерения (1) стремится к нулю в отсутствие элементов случайного маневра  $\sigma_{\mu k}^2 = 0$  (детерминированная модель движения цели)

$$\sigma_{k+1}^2 = \frac{\sigma_k^2 \sigma_y^2}{\sigma_k^2 + \sigma_y^2}. \quad (2)$$

Таким образом, при использовании последовательных методов и отсутствии случайного маневра цели точность измерений по мере поступления новых наблюдений непрерывно повышается. При этом следует учитывать, что необходимое качество оценки траекторных параметров обеспечивается лишь после получения значительного количества измерений.

В отличие от рассмотренных последовательных измерений при использовании методов многообзорного наблюдения блочного типа результирующая оценка получается путем одновременной обработки совокупности нескольких измерений (замеров). В качестве оценки максимального правдоподобия обычно выбирают оценку по методу наименьших квадратов. Такая оценка обосновывается, исходя из нормального закона ошибок измерения.

Качество получаемой траекторной информации в сильной степени зависит от интервала времени, на котором реализуется наблюдение. Если многообзорное наблюдение реализуется на достаточно длительном интервале (практически интервал в несколько минут), то по результатам обнаружения могут быть отобраны необходимые для дальнейшей оценки траектории «опорные точки». В ряде случаев эти точки, полученные при меньших отношениях сигнал-шум, характеризуются большими дисперсиями ошибок оценки координат. Для оценивания параметров траектории ВОКО необходима дальнейшая совместная весовая обработка результатов измерений.

Ещё одним источником ошибок метода многообзорного наблюдения блочного типа может быть вероятностный характер отбора отметок обнаруженной траектории для последующей оценки её (траектории) параметров. С использованием известного преобразования Хафа можно определить лишь область исходного пространства, в пределах которой могут находиться отметки, использу-

емые в дальнейшем для нахождения траекторных параметров. Среди выделенного таким образом множества будут точки, принадлежащие как истинной траектории цели, так и отметки, обусловленные ложными выбросами.

Выбору оптимальных размеров ячеек аккумулятора Хафа посвящено большое количество работ. Обычно размеры ячеек аккумулятора Хафа выбирают из необходимости обеспечения заданных показателей обнаружения: малые размеры ячеек не позволяют эффективно накапливать отметки от цели, излишне большие способствуют накоплению шумовых выбросов [6, 8]. В то же время размер ячеек оказывает влияние и на точность оценки параметров траектории. Так для ячеек излишне больших размеров совокупность координат отметок, используемых для оценки параметров траектории по методу НК, будет включать координаты шумовых выбросов или других объектов. Если же размеры ячеек необоснованно уменьшены, часть траекторной информации (координаты отдельных отметок) исключается из дальнейшей обработки.

Анализ показывает, что методом многообзорного наблюдения могут быть обнаружены траектории ВОКО, а также выполнена предварительная оценка траекторных параметров. Расчеты показывают, что оценки траекторных параметров, полученные блочным методом с использованием многообзорного наблюдения, характеризуются достаточно высоким качеством. При этом методы последовательного типа обеспечивают оценку траекторных параметров необходимого качества лишь после определенного шага обработки результатов очередного текущего измерения. Необходимо также учитывать, что на качестве оценок, полученных на основе многообзорного наблюдения, сказывается сравнительно невысокое отношение сигнал-шум в процессе обнаружения траекторий и оценивании их параметров. В целом качество оценок последовательного и блочного методов оказывается сравнимо.

### Заключение

Проведенные исследования показали, что применение алгоритмов многообзорного наблюдения для организации перспективных режимов поиска, обнаружения и высокоточного сопровождения ВОКО является достаточно эффективным.

В штатном режиме функционирования РЛС ДО по результатам многообзорного наблюдения может осуществляться обнаружение траекторий ВОКО и оценка траекторных параметров. Качество получаемой при этом траекторной информации зависит от выбранного интервала наблюдения.

В современных многофункциональных РЛС ДО алгоритмы многообзорного наблюдения для обнаружения ВОКО целесообразно рассматривать в качестве дополнительных.

### Литература

1. *Вениаминов С. С., Червонов А. М.* Космический мусор угроза человечеству. М.: Ротапринт ИКИ РАН, 2012, 190 с.
2. *Суханов С. А., Шилин В. Д., Морозов Н. П., Курьянов А. А.* Система контроля космического пространства как основной источник информации о космической обстановке // Автоматизация процессов управления. 2009. № 15. С. 15–22.
3. *Макаренко С. И.* Использование космического пространства в военных целях: современное состояние и перспективы развития систем информационно-космического обеспечения и средств вооружения // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 4. С. 161–213.
4. *Бабкин Ю. В., Якубовский С. В.* Возможность мониторинга высокоорбитальных космических объектов радиолокационными средствами дальнего обнаружения // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2017. № 4. Вып. 2. С. 28–33.
5. *Курикша А. А., Шилин В. Д.* Перспективы радиолокации космических объектов // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Радиолокационная техника. 2001. № 2. С. 42–45.
6. *Carlson B. D., Evans E. D., Wilson S. L.* Search radar detection and track with the Hough transform. System concept // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1994. Vol. 30. No.1. Part I: 102–108; Part II: 109–115; Part III: 116–124.
7. *Кричигин А. В., Маврычев Е. А.* Алгоритмы многообзорного обнаружения траектории движущейся цели // Труды НГТУ им. Алексея П. Е. 2010. № 4(83). С. 11–18.
8. *Монаков А. А.* Обнаружитель движущейся цели для радиолокационного приемника на основе алгоритма Хафа // Сборник трудов XX Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC-2014) (Воронеж, 15–17 апреля 2014 г.). Воронеж, 2014. Т. 3. С. 1584–1594.
9. *Barniv Y.* Dynamic programming solution for detecting dim moving targets // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1985. Volume: AES-21. No. 1. Pp. 144–156.
10. *Tonissen S. M., Evans R. J.* Performance of dynamic programming techniques for track-before-detect // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1996. Vol. 32. No. 4. Pp. 1440–1451.
11. *Голубев А. В., Силантьев А. Б.* Алгоритм функционирования канала многообзорного наблюдения перспективной РЛС // Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXIV Международной научно-технической конференции (Воронеж, 17–19 апреля 2018 г.). Воронеж: ООО «Велборн», 2018. Т. 2. С. 343–350.
12. *Голубев А. В., Егоров С. А., Силантьев А. Б.* Анализ эффективности многообзорного накопления радиолокационных сигналов на основе преобразования Хафа // Вестник воздушно-космической обороны. 2018. Вып. 3(19). С. 44–48.
13. *Голубев А. В., Силантьев А. Б., Фернанду К. А. Г., Олим Ж. С. М.* Формирование матрицы многообзорных наблюдений в системе обработки радиолокационной информации при реализации алгоритма Хафа // Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов XXV Международной научно-технической конференции «RLNC2019» (Воронеж, 16–19 апреля 2019 г.). Воронеж: Воронежский государственный университет, 2019. Т. 3. С. 367–376.
14. *Жуков А. О., Окунев Е. В.* Радиотехнический мониторинг окружающей среды пространственно-распределенными информационными системами // Труды третьей Всероссийской научно-технической конференции молодых конструкторов и инженеров «Минцевские чтения» (Москва, 26 ноября 2015 г.). Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. С. 293–303.
15. *Жуков А. О., Зубарев А. Н., Оводенко В. Б., Тютин И. В., Трекин В. В.* Особенности условий функционирования РЛС в высоких широтах // Радиотехника. 2016. № 10. С. 153–158.





## DETECTION AND OBSERVATION OF HIGH-ALTITUDE SPACE OBJECTS USING THE MULTI-VIEW OBSERVATION ALGORITHM

### ALEXANDER B. SILANTYEV,

Yaroslavl, Russia, a.silantev@uniyar.ac.ru

### YURIY V. BABKIN,

Moscow, Russia, YuVIBabkin@yandex.ru

### ALEXANDER V. TIMOSHENKO,

Moscow, Russia, atimoshenko@rti-mints.ru

### SERGEI V. YAKUBOSKY,

Moscow, Russia, syakubovskiy@mail.ru

**KEYWORDS:** Near-Earth space; high-altitude object; artificial Earth satellite; radiolocation; radar; space surveillance; space pollution.

### ABSTRACT

Based on the results of the conducted research, it is shown that the operational refinement of the space surveillance catalog with data on the parameters of the orbits of , high-altitude object (HAO) can be provided using early-warning radars (EW radar). Increased radar detection when working on HAO is possible by increasing the station's capacity or increasing the duration of observation. The increase in potential is directly related to the creation of new powerful energy-consuming radars. It is established that the increase in observation time is possible without significant material costs. This boils down to the development and implementation of long-term (multi-view) surveillance methods, which are called "track-before-detect" (TBD) in modern technical literature. When using them, the decision about the presence of a target is not made in each individual review, and tracking algorithms are used to detect moving objects. The principal possibility of extending the radar range when detecting and measuring the parameters of the trajectory of the HAO is proved due to the joint processing of the results of several soundings. An algorithm for detecting and tracking HAO is proposed. It is based on incoherent accumulation of signal information from several probes and transformation of the information into a parametric space. Then, search for and evaluate the parameters of their trajectories. That the use of such an algorithm does not lead to the need to increase the power potential of the radar. It shows the disadvantages that prevent the implementation of the algorithm as the main one, and the possibility of its application as an additional one in the path of radar information processing. The quality of trajectory information obtained during multi-view observation is analyzed. It is established that when using multi-view block-type observation methods, the necessary quality of

preliminary estimation of trajectory parameters is provided by simultaneous processing of a set of measurements. An additional source of errors may be the probabilistic nature of selecting marks of the detected trajectory for subsequent estimation of its parameters.

### REFERENCES

1. Veniaminov S.S., Chervonov A.M. *Kosmicheskiy musor ugroza chelovechestvu* [Space debris is a threat to humanity]. Moscow: Rotaprint IKI RAS, 2012. 190 p. (In Rus)
2. Sukhanov S. A., Shilin V. D., Morozov N. P., Kupriyanov A. A. Space Monitoring System As Main Source of Data on Space Situation. *Automation of Control Processes*. 2009. No. 1 (15). C. 15-22. (In Rus)
3. Makarenko S. Information-Space Systems and Space Weapons - Current State and Prospects o Improvement Systems of Control. *Communication and Security*. 2016. No. 4. Pp. 161-213. (In Rus)
4. Babkin Yu. V., Yakubovsky S. V. Monitoring of space objects in medium earth orbit with early-warning radar. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*. 2017. No. 4. Pt. 2. Pp. 28-33. (In Rus)
5. Kuriksha A. A., Shilin V. D. Perspektivy radiolokatsii kosmicheskikh ob"ektov [Prospects of space object radar]. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Radiolokatsionnaya tekhnika* [Radio electronics. Series: Radar equipment]. 2001. No. 2. Pp. 42-45. (In Rus)
6. Carlson B.D., Evans E.D., Wilson S.L. Search radar detection and track with the Hough transform. System concept. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 1994. Vol. 30. No.1. Part I: 102-108; Part II: 109-115; Part III: 116-124.

7. Krichigin A.V., Mavrychev E. A. Multi-scanning detection algorithms of moving target track. *Transactions of Nizhni Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alexeev*. 2010. No. 4 (83). Pp. 11-18. (In Rus)
8. Monakov A. A. Obnaruzhitel' dvizhushcheysya tseli dlya radiolokatsionnogo priemnika na osnove algoritma Khafa [A moving target Detector for a radar receiver based on the Hough algorithm]. *Sbornik trudov XX Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz"* [Proceedings of the XX International scientific and technical conference "Radar, navigation, communication" (RLNC-2014), Voronezh, April 15-17, 2014]. Voronezh, 2014. Vol. 3. Pp. 1584-1594. (In Rus)
9. Barniv Y. Dynamic programming solution for detecting dim moving targets. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 1985. Vol. AES-21. No. 1. Pp. 144-156.
10. Tonissen S. M., Evans R. J. Performance of dynamic programming techniques for track-before-detect. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 1996. Vol. 32. No. 4. Pp. 1440-1451.
11. Golubev A.V., Silantev A. B. Algoritm funktsionirovaniya kanala mnogoobzornogo nablyudeniya perspektivnoy RLS [Algorithm of functioning of the multi-view surveillance channel of a prospective radar station]. *Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz': Sbornik trudov XXIV mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Radar, navigation, communication: Proceedings of the XXIV International scientific and technical conference, Voronezh, April 17-19, 2018]. Voronezh: Velborn LLC, 2018. Vol. 2. Pp. 343-350. (In Rus)
12. Golubev A.V., Egorov S. A., Silantev A. B. Performance analysis of multi-scanning signal integration based on Hough transformation. *Vestnik vozdushno-kosmicheskoy oborony* [Bulletin of aerospace defense]. 2018. Issue 3 (19). Pp. 44-48. (In Rus)
13. Golubev A. V., Silantev A. B., Fernandu C. A. G., Olim J. S. F. Formirovanie matritsy mnogoobzornykh nablyudeny v sisteme obrabotki radiolokatsionnoy informatsii pri realizatsii algoritma Khafa [Generation of multiscanning observations matrix at the radar information processing system based on Hough Algorithm]. *Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz': sbornik trudov XXV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Radar, navigation, communication: Proceedings of the XXV International scientific and technical conference, Voronezh, April 16-19, 2019]. Voronezh, 2019. Pp. 367-376. (In Rus)
14. Zhukov A.O., Okunев E.V. Radio engineering monitoring of environment by the spatial distributed information systems. *Trudy tret'ey Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh konstruktorov i inzhenerov "Mintsevskie chteniya", posvyashchennaya 70-letiyu Radiotekhnicheskogo instituta imeni akademika A.L. Mintsy i 70-letiyu FIZTEKhA* [Proceedings of the third all-Russian scientific and technical conference of young designers and engineers "Mintsevsky readings", dedicated to the 70th anniversary of the radio Engineering Institute named after academician A. L. mints and the 70th anniversary of FIZTECH, Moscow, November 26, 2015]. Moscow: Bauman MSTU Publ., 2016. Pp. 293-303. (In Rus)
15. Zhukov A. O., Zubarev A. N., Ovodenko B. V., Tyutin I. V., Trekin V. V. Peculiarities of the conditions of operation of the radar at high latitudes. *Radioengineering*. 2016. No.10. Pp. 153-158. (In Rus)

**INFORMATION ABOUT AUTHORS:**

Silantev A.B., PhD, Docent, Professor of the Department of Yaroslavl Higher Education Military School of Anti-Air Defense;  
 Babkin Yu.B., Leading engineer of JSC "Academician A.L. Mints Radiotechnical Institute";  
 Timoshenko A.V., PhD, Full Professor, Head of the Department – Deputy General Designer of JSC "Academician A.L. Mints Radiotechnical Institute"; Head of the Laboratory of the National Research University of Electronic Technology;  
 Yakubovsky S.V., PhD, Docent, Head of the Department of the Research and testing center of the Central research Institute of the aerospace defense forces of the Ministry of Defense of the Russian Federation

---

**For citation:** Silantev A.B., Babkin Yu.B., Timoshenko A.V., Yakubovsky S.V. Detection and observation of high-altitude space objects using the multi-view observation algorithm. *H&ES Research*. 2020. Vol. 12. No. 4. Pp. 15-22. doi: 10.36724/2409-5419-2020-12-4-15-22 (In Rus)



# ВСЕРОССИЙСКАЯ МЕЖВЕДОМСТВЕННАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

по теоретическим и прикладным проблемам  
развития и совершенствования АСУ  
и связи специального назначения

НИУ МИЭТ  
Москва, Зеленоград

20 октября

*Тематика конференции включает работу следующих секций:*

- 01 Состояние и перспективы развития современных автоматизированных систем управления специального назначения.
- 02 Математическое, программное и информационно-лингвистическое обеспечение автоматизированных систем управления
- 03 Безопасность в автоматизированных системах управления специального назначения
- 04 Применение современных инфокоммуникационных технологий и средств при разработке, техническом обеспечении и эксплуатации автоматизированных систем управления специального назначения
- 05 Состояние и перспективы развития систем, комплексов и средств радиосвязи специального назначения
- 06 Проблемы развития автоматизированных систем управления технологическим процессом

*По итогам конференции отобранные оргкомитетом доклады в виде статей будут опубликованы в журналах из Перечня ВАК, РИНЦ.*

*Участие в конференции и публикация материалов в сборнике тезисов БЕСПЛАТНО.*

[http://intech-spb.com/conferences/konferencia\\_asu\\_vka@mail.ru](http://intech-spb.com/conferences/konferencia_asu_vka@mail.ru)

*Организаторы*

ЗАО "НПЦ ИРС"  
НИУ "МИЭТ"  
ООО "ИНТЕХ"

*Информационные партнеры*

T-comm  
Информация и космос  
H&ES Research  
I-methods  
Техника средств связи



doi: 10.36724/2409-5419-2020-12-4-24-35

# МЕТОД СИНТЕЗА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЕРРИТОРИАЛЬНО-РАСПРЕДЕЛЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ СВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

**ВИНОГРАДЕНКО****Алексей Михайлович****АННОТАЦИЯ**

Работа посвящена разработке интеллектуальной системы контроля территориально-распределенных комплексов связи специального назначения. Актуальность вызвана необходимостью согласования эволюционного развития контролируемых телекоммуникационных систем, на примере комплексов связи специального назначения, характеризующихся территориальной распределенностью, топологической, пространственно-временной неоднородностью и систем контроля их технического состояния, с учетом развития базовых технологий искусственного интеллекта, что является концептуально важным в краткосрочной перспективе. Представлен метод синтеза интеллектуальной системы контроля, характеризуемой многоуровневой архитектурой построения и функционированием, в зависимости от степени аварийной ситуации, в режимах экспресс- и полного контроля, что предполагает использование баз данных (знаний) и адаптацию процессов контроля к воздействию дестабилизирующих факторов. В работе показан подход к процессам проактивного контроля параметров объектов, заключающийся в адаптивной подстройке профилактических допусков на проверяемые параметры и использовании адаптивных механизмов опроса интеллектуальных датчиков на базе моделей поллинга, учитывающий корреляцию срабатывания группы датчиков в пределах объекта контроля в условиях аварийных ситуаций и способствующий увеличению оперативности фиксации и передачи аварийного сигнала, а также снижению избыточности измерительной информации в измерительном тракте системы контроля. В результате синтеза многоуровневой интеллектуальной системы контроля предложена архитектура системы, позволяющая определить наиболее рациональное соотношение измерительных каналов (интеллектуальных датчиков, аналого-цифровых преобразователей, устройств выборки и хранения), с учетом помехоустойчивости и пропускной способности измерительных трактов, а также необходимого числа каналов связи. Многоуровневая архитектура системы контроля позволяет производить анализ измерительной информации (аварийных сигналов) на сенсорном уровне системы и онлайн-анализ потоковых данных (телеметрических сообщений) для оперативного обнаружения случаев возникновения возможных отказов, прогнозирования остаточного ресурса оборудования комплексов связи специального назначения.

**Сведения об авторе:**

к.т.н., доцент, докторант Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия, vinogradenko.a@inbox.ru

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** интеллектуальная система контроля; комплексы связи; датчики; измерительная информация; контролируемые параметры; аварийные сигналы.

**Для цитирования:** *Винограденко А.М.* Метод синтеза интеллектуальных систем контроля технического состояния территориально-распределенных комплексов связи специального назначения // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2020. Т. 12. № 4. С. 24-35. doi: 10.36724/2409-5419-2020-12-4-24-35



## Введение

В настоящее время для создания территориально-распределенной системы контроля технического состояния (ТС) комплексов связи (КС) специального назначения (СН), практически отсутствует четкая теоретическая база, позволяющая рассматривать процессы контроля ТС с единых системных позиций, объективно оценивать реальные возможности по передаче аварийных сигналов, оценке и анализу ТС КС, функционирующих в условиях различных видов отказов в режиме времени близком к реальному. Используемые для расчета эвристические процедуры и методики, не учитывают уже существующие технические средства, частично входящие в состав КС СН, развернутые на их основе интегрированные системы контроля, а также новые технологии интеллектуального контроля ТС сложных технических объектов [1–3].

Важной особенностью современных КС СН с изменяющимся характером, условиями применения в процессе своего функционирования (их вариативности), большого охвата и территориальной распределенности является структурная, топологическая, а также пространственно-временная неоднородность, что затрудняет решение задач контроля традиционными методами. Задействование КС СН в циклах выполнения особых задач характеризует их как объекты контроля (ОК) с высокой ценой отказа, объекты «ответственного назначения» [4].

Эволюционное развитие КС СН, позволяет относить их к классу сложных многоуровневых управляемых систем. При этом основной проблемой различных контуров управления от уровня управления ТС средства связи до уровня управления сетью связи является неопределенность: на нижнем уровне управления не учитываются предстоящие условия функционирования, на верхних уровнях — реальное ТС КС [5].

В науке сложилось два принципиально различающихся подхода к решению данной проблемы: оптимистический, предполагающий идеальность внешних условий функционирования средств связи, и пессимистический, рекомендуемый рассчитывать только на наихудший случай.

Указанные подходы при оценке ТС средств связи или других элементов сети связи отражаются в выборе контрольных допусков, определяющих ошибки первого и второго рода. Очевидно, первый подход приводит к большим потерям при реализации условий, отличных от прогнозируемых, что приводит к снижению качества функционирования средства связи (ошибки второго рода), а второй подход заведомо требует большего расхода ресурса, даже если реальные условия позволяют этого избежать (ошибки первого рода). Из этого следует вывод о необходимости компромисса в использовании указанных подходов, который может быть реализован только при контроле качества функционирования средства связи в сети связи при определенных внешних условиях. Но вопрос о том, что должен из себя представлять подобный компромисс, в частности, при решении задач моделирования системы контроля ТС КС, синтеза алгоритмов контроля ТС, остается открытым.

В последнее время наиболее перспективными в области диагностики, контроля ТС технически сложных, динамических объектов (систем) представляются подходы, основанные на использовании передовых методов анализа больших массивов данных на базе инновационных технологий искусственного интеллекта. Использование интеллектуальных технологий, проактивного контроля позволит сформировать и развивать в дальнейшем прогнозирующие модели процессов контроля для предотвращения отказов критически важных элементов (КВЭ) КС СН. Подобный подход позволит перейти к новым системам контроля ТС современных КС СН с учетом прогнозирования изменения ТС объектов, систем связи с целью достижения их максимальной производительности при минимальных рисках [6, 7]. Это определяется своевременностью получения измерительной информации (ИИ), полученной в режиме реального времени, по результатам которой в системах управления, поддержки и принятий решений осуществляется оптимальный выбор стратегий воздействия на оборудование при необходимости (рис. 1). Такие решения соблюдают оптимальный баланс между затратами на проведение технических воздействий и величиной потенциальных рисков от отказа КС СН.



Рис. 1. Структурная схема процесса интеллектуального контроля ТС КС СН

Проведенный анализ функционирования систем дистанционного контроля удаленных сложных технических объектов показал, что телеметрические системы (системы телесигнализации (СТС) и системы телеизмерения (СТИ)) являются наиболее предпочтительными системами, используемые для решения задач интеллектуального контроля территориально-распределенных КС СН [8, 9].

Предлагаемый метод предназначен для обеспечения своевременной обработки и передачи по измерительным трактам ТМИ при требуемых значениях показателей преобразования (обслуживания) данных и помехоустойчивого приема сообщений. Моделируемая интеллектуальная система контроля (ИСК) имеет многоуровневую структуру, что подтверждается наличием в ее структуре сенсорного, телекоммуникационного и диспетчерского уровней. Указанная цель достигается путем системного анализа процессов обработки и передачи ТМИ, а также синтеза сенсорного и телекоммуникационного уровней ИСК, в которых осуществляется сбор данных, по результатам измерений.

Снижение избыточности ИИ, циркулирующей в процессе контроля в ИСК, при необходимой оперативности и требуемой достоверности, возможно за счет автоматического выбора режимов контроля: экспресс- и полного контроля, в зависимости от степени развития аварийной ситуации и достигаемого гибкостью правила подключения необходимого числа датчиков [10–12].

Объектом исследования является сенсорный и телекоммуникационный уровни ИСК, в которых реализуются функции сбора, преобразования, пакетирования и помехоустойчивого кодирования ТМИ и дальнейшей передачи по измерительному тракту.

*Целью исследования является* формирование такой структуры и состава ИСК, при которой выполняются требования к точности, оперативности и достоверности контроля ТС территориально-распределенных КС СН.

### 1. Описание метода синтеза ИСК ТС КС

Процесс обработки аварийных сигналов предлагается согласно модели, отражающей процесс интеграции существующих классов систем: аварийный сигнал формируется только в случае превышения контролируемым параметром  $Y$  установленного порогового уровня (как в СТС) с последующим измерением (как в СТИ) величины выброса над порогом [13].

Метод синтеза основывается на использовании трех процедур системного анализа:

1. Декомпозиции и моделировании основных процессов контроля (обработки ТМИ): фиксации аварийных сигналов, их оценивания, аналого-цифрового преобразования, формирования телеметрических кадров, пакетирования, передачи (обмена) аварийных сигналов на диспетчерский пункт управления (ДПУ) ИСК для дальнейшего

принятия управляющих решений со стороны системы поддержки принятия решений (СППР) автоматизированных систем управления связью (АСУС);

2. Параметрического синтеза (оптимизации разрядности аналого-цифрового преобразователя (АЦП) по критерию минимума суммарной дисперсии ошибок квантования и канальной ошибки; оптимизации длины пакетов ТМИ по критерию минимума потерь в пропускной способности канала с помехоустойчивым кодированием);

3. Синтеза структуры сенсорного и телекоммуникационных уровней ИСК, прежде всего, численного состава системы (измерительных каналов (интеллектуальных датчиков), устройств выборки и хранения (УВХ), АЦП, каналов связи измерительного тракта) с учетом требований к пропускной способности и достоверности передачи ТМИ.

Исходя из этого, структура метода синтеза системы контроля ТС КС СН может быть представлена как показано на рис. 2.

Под интеллектуальным датчиком (ИД), используемом на сенсорном уровне ИСК, понимается измерительный преобразователь, параметры и алгоритмы работы которого в процессе эксплуатации могут изменяться, с целью повышения точности и достоверности результатов измерений, в зависимости от сигналов, содержащихся в самом датчике преобразователей<sup>1</sup>. ИД может обеспечивать адаптацию (приспособление) к диапазону изменения измеряемой величины, к скорости ее изменения, к воздействию влияющих дестабилизирующих факторов (ДФ, например, помехи), а также обладать функцией самообучения, самовосстановления и др. Параметры и алгоритмы работы ИД в процессе эксплуатации могут изменяться в зависимости от внешних сигналов, поступающих с управляющего устройства.

В рамках процессов проактивного контроля КВЭ КС, операций регистрации результатов измерения параметров, с целью предотвращения возможности возникновения аварийной ситуации, и предварительной сигнализации до факта ее возникновения в прогнозирующих режимах ИСК необходима автоматическая адаптивная подстройка профилактических допусков на проверяемые параметры.

### *Процесс поллинга аварийных сигналов на сенсорном уровне ИСК*

В системах мониторинга, контроля для регистрации аварийных сигналов, поступающих с датчиков используют правила упорядоченного опроса, получившие название поллинга [14]. Помимо сходства по математическим моделям с приоритетными системами массового обслуживания (СМО), приоритеты в системах поллинга назначаются по определенному правилу, а их параметры могут изменяться динамически.

<sup>1</sup>ГОСТ Р 8.673–2009. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения. М.: Стандартинформ. 2010. 8 с.

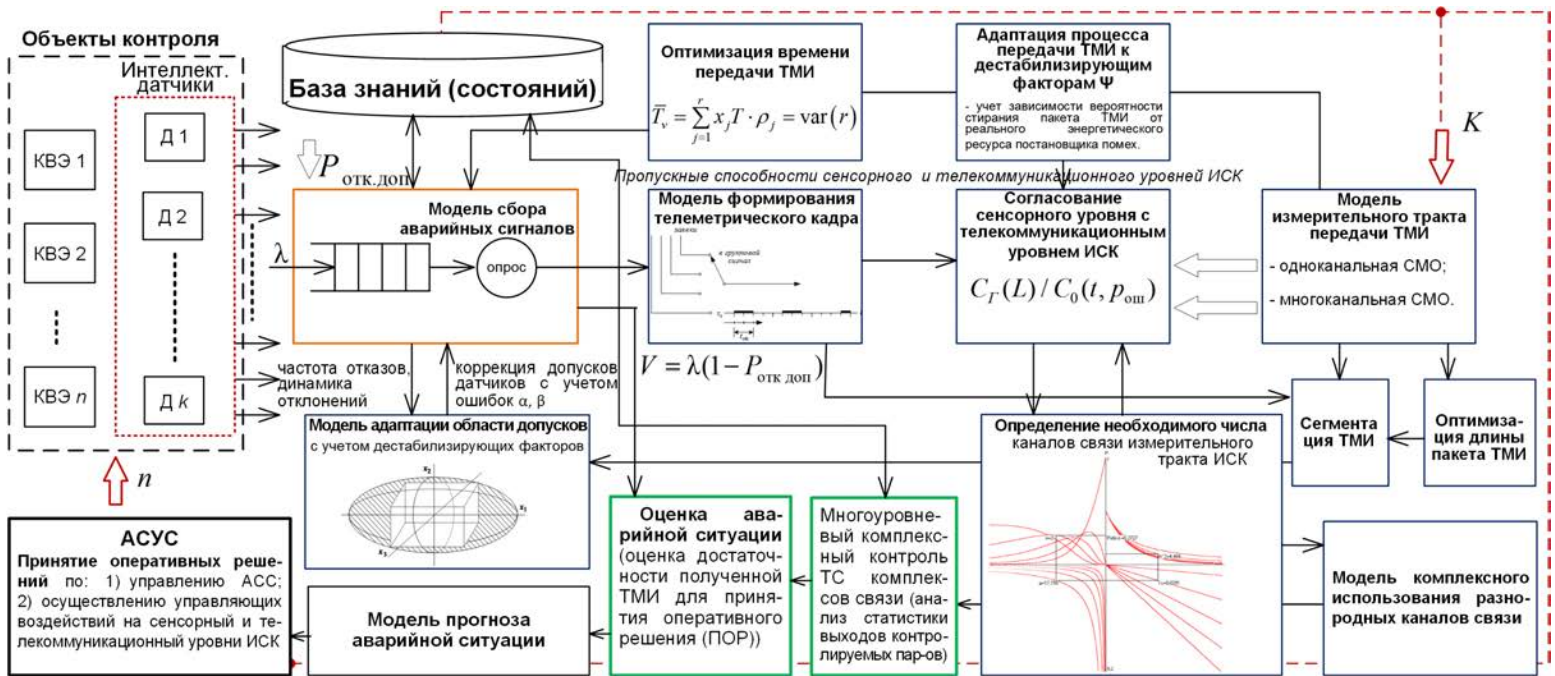


Рис. 2. Структура метода синтеза системы контроля ТС КС СН

Сигналы о превышении контролируемыми параметрами установленных допусков, поступающие в сенсорный уровень ИСК с ИД в случайные моменты времени, представляют собой входной поток заявок с пуассоновским распределением. Тогда сенсорный уровень ИСК ТС территориально-распределенных КС, включающий сотни (тысячи) ИД и осуществляющий их опрос, можно представить, как систему поллинга с определенной дисциплиной обслуживания. В большинстве работ, посвященных разработке и исследованию различных моделей систем передачи данных [14, 15], разработаны методы упорядоченного поллинга, в которых число ИД, фиксирующих отклонение контролируемого параметра от нормы, то есть «генерирующих» аварийные сигналы, сравнимо с их общим числом. Однако для моделируемой ИСК ТС территориально-распределенных КС, включающей множество ИД, такой подход будет неэффективным, так как время опроса датчиков будет пропорционально их общему числу, а, следовательно, критически большим. Таким образом, необходимо разработать такой способ опроса, основанный на групповом поллинге, когда несколько ИД одновременно передают ИИ, что позволит существенно сократить время, необходимое для выявления аварийной ситуации и степени ее развития.

Рассмотрим сенсорную сеть, обслуживающую  $N$  КВЭ, на  $n$ -ом КС установлено  $d_j$  ИД  $j=1, \dots, N$ ;  $d^* = \max_{j=1, \dots, N} d_j$  — максимально возможное число ИД на одном КВЭ предполагается относительно небольшим.

Таким образом, имеется  $v = \sum_{j=1}^N d_j$  ИД и требуется разработать правило их опроса для наиболее быстрого выявления  $s_j$  ИД, передающих аварийный сигнал и оценки степени аварийной ситуации.

Допустим, что  $N$  велико, а максимальное число одновременно срабатывающих ИД  $z_j$  при возникновении аварийной ситуации относительно невелико. В данном случае в группу опрашиваемых ИД включаем только те, которые зафиксируют аварийный сигнал одновременно.

Отметим, что вероятность возникновения аварийной ситуации  $p_a$  в сети не известна. Однако использование в алгоритме управления опросами верхней границы этой вероятности для расчета допустимого числа ИД, фиксирующих аварийные сигналы неэффективно, поскольку используемый метод группового поллинга чувствителен к предполагаемому количеству ИД. Это связано с тем, что при неправильном задании предполагаемого числа ИД, фиксирующих аварийные сигналы значительно падает информативность данных опроса. Такая ситуация является наиболее типичной для территориально-распределенной системы контроля, а вероятность аварии на ее локальном участке мала [15, 16].

При возникновении аварийной ситуации на  $n$ -ом КС одновременно срабатывает  $z_j$  ИД, где  $z_j$  — дискретная случайная величина с распределением на множестве  $\{1, \dots, d_j\}$ . Распределение величины зависит от соответствующего объекта, причины возникновения аварийной ситуации, рас-

положения ИД и т.д. Все эти обстоятельства обычно неизвестны или их трудно учесть. Поэтому рассматривается предположение, что вероятность срабатывания всех ИД на одном КС достаточно велика. Состояние КС описывается переменными  $x_1, \dots, x_p$ , которые принимают значение «0» или «1». Значение «0» предполагает отсутствие аварийного сигнала, а «1» — наличие аварийного сигнала, фиксируемого ИД. Групповой опрос задается с помощью вектора  $a=(a_1, \dots, a_j)$ , где  $a_j$  принимает значения «0» или «1». Значение  $a_j=1$  означает, что  $j$ -й ИД не участвует в опросе. Если  $N$  — число опросов, то все опросы задаются булевой матрицей опросов  $A=(a^1, \dots, a^N)^N$ , где  $a^h$  — вектор  $h$ -го опроса,  $h = 1, \dots, N$ . Если в группе опрашиваемых ИД имеется хотя бы один, фиксирующий аварийный сигнал, то отмечаем наличие аварийного сигнала как «1». Если в группе нет ни одного подобного ИД, то от нее не поступает ни одного сигнала, что интерпретируется как «0». Таким образом, в качестве отклика от ИД  $j$ -ой группы сформируется результат

$$q_j = (a_1^j \wedge x_1) \vee (a_p^j \wedge x_p),$$

где  $\wedge$  — булево произведение,  $\vee$  — булева сумма.

Таким образом, в территориально-распределенных КС СН использование способа группового поллинга вполне оправдано как со стороны увеличения оперативности фиксации и передачи аварийного сигнала, так и со стороны уменьшения избыточности ИИ при большом количестве ИД. Для разбиения множества ИД на КС целесообразно использовать пофакторный способ обработки результатов наблюдений, неоднородность структуры, топологии КС или другие методы, учитывающие корреляцию срабатывания всех ИД, расположенных на соответствующем КВЭ КС в условиях аварийных ситуаций.

### Используемые показатели передачи ТМИ

Измерительных каналы, характеризуемые числом и типом ИД, передают аварийные сигналы по сенсорному уровню ИСК для последующей обработки. Время преобразования данных сигналов в дискретную форму в процессе обслуживания заявок подчинено экспоненциальному распределению. В таком случае сенсорный уровень ИСК моделируется как система массового обслуживания (СМО) вида  $M/M/k/m$ , т.е. как  $k$ -канальная (по числу АЦП) СМО с очередью, ограниченной количеством  $m$  УВХ [17].

Показателями такой СМО являются абсолютная пропускная способность (количество обслуженных заявок в единицу времени)  $A_{СМО} = \lambda(1 - P_{отк})$  и среднее время ожидания заявки в очереди  $\bar{t}_{ож}$ , где  $\lambda = \sum_{j=1}^D \Lambda_j$ ,  $\Lambda_j$  — интенсивность поступления заявок с одного из  $D$  измерительных каналов  $P_{отк} = (\rho^{k+m}/k^m k!)p_0$  — вероятность отказа в обслуживании заявок;

$$P_{отк} = \frac{\rho^k \{1 - (\rho/k)^m [1 + m(1 - \rho/k)]\}}{\mu \cdot k \cdot k! (1 - \rho/k)^2} p_0$$

$$p_0 = \left( \sum_{j=0}^k \frac{\rho^j}{j!} + \frac{\rho^{k+1}}{k \cdot k!} \cdot \frac{[1 - (\rho/k)^m]}{(1 - \rho/k)} \right)^{-1};$$

$$\rho = \lambda/\mu; \mu = 1/\bar{t}_p;$$

$\bar{t}_p$  — среднее обслуживания заявки, соответствующее времени разряда конденсатора УВХ при АЦП сигнала. Из обслуженной заявки формируется телеметрическое сообщение длиной  $n+d$ , содержащее информационную и адресную части, где  $n = \log_2 L$  — число разрядов кода результатов измерения при наличии  $L$  уровней квантования;  $d = \log_2 D$  — число разрядов кода номера измерительного канала. В этом случае битовая пропускная способность сенсорного уровня ИСК равна произведению абсолютной пропускной способности СМО и размерности телеметрического сообщения, т.е.  $A_{СУ} = \lambda(1 - P_{отк})(n + \log_2 D)$ .

Зависимость времени ожидания  $t_{ож доп}$ , допустимого для исключения погрешности счета, от разрядности двоичного кодирования оцифрованных сигналов определена в процессе технологического моделирования сенсорного уровня ИСК:  $t_{ож доп} = t_{p max} K_{УВХ} / 2^{n+1}$ , где  $t_{p max}$  — максимальное время разряда конденсатора в составе УВХ;  $K_{УВХ}$  — коэффициент, учитывающий технологические параметры устройства выборки и хранения.

При построении модели оцифровки ТМИ определен характер влияния выбираемой разрядности  $n$  двоичного кодирования сигнала на дисперсию ошибки восстановления элементов сообщений по отношению к переданным, состоящей из суммы дисперсий ошибки (шума) квантования  $\sigma_{кв}^2$  и канальной ошибки  $\sigma_{\pi}^2$ :  $\sigma_{\pi}^2(n) = \sigma_{\pi}^2(n) + \sigma_{кв}^2(n, p_{отк})$ . В отличие от канальной ошибки шум квантования не связан с помехами в канале и целиком определяется выбором числа уровней квантования  $L=2^n$ . Показатель  $\sigma_{\pi}^2$  аналитически связан с вероятностью ошибки поэлементного приема сообщений  $p_{отк}$ , являющейся показателем достоверности передачи сообщений в физическом канале связи (ФКС).

Зависимость  $p_{отк}$  от энергетического параметра  $h^2$  (отношения энергий сигнал/помеха) и статистических характеристик распространения сигналов  $\gamma^2$  составляют модель ФКС. На основании данной зависимости при допустимом значении вероятности ошибки  $p_{отк доп}$  рассчитывается пропускная способность ФКС  $C_0$ .

В современных системах связи из битового потока информации формируются пакеты длиной  $N=K+R$ , где  $K$  и  $R$  — количество соответственно информационных и проверочных (избыточных) элементов сообщения. Соотношение  $K$  и  $R$  определяется выбором помехо-

устойчивого кода, за счет которого решающая схема на выходе дискретном канале связи (ДКС) либо исправляет обнаруженные ошибки, либо стирает пораженный пакет с запросом повторной его передачи. В случае перезапроса пакетов гарантированная пропускная способность ДКС будет меньше, чем в ФКС, и определяется выражением:  $C_{\Gamma} = (K/N)(1 - p_{\text{ош}})^N \cdot C_0$ .

## 2. Алгоритм синтеза сенсорного уровня ИСК

Схема алгоритма синтеза сенсорного уровня ИСК представлена на рис. 3.

Исходными данными являются:

- технологические параметры ИД, УВХ и АЦП (емкость конденсатора хранения  $C_{\text{хр}}$ , время его заряда  $t_1$ , опор-

ное напряжение разряда  $U_{\text{оп}}$ , максимальное время разряда конденсатора  $t_{n \text{ max}}$ , частота счетных импульсов);

- параметры обслуживания заявок (интенсивности поступления заявок с измерительных каналов  $\{\Lambda_j\}_{j=1, \dots, D}$ , допустимая вероятность отказа в обслуживании заявки  $p_{\text{отк. доп}}$ );

- характеристики измерительного тракта ИСК (допустимая вероятность ошибки поэлементного приема сообщений  $p_{\text{ош. доп}}$ , мощности сигналов и помех, статистические характеристики флуктуаций их уровней).

На рис. 3 представлена блок-схема алгоритма синтеза сенсорного уровня ИСК. Все элементы приведенной блок-схемы алгоритма условно разделены на группы выполняемых операций:

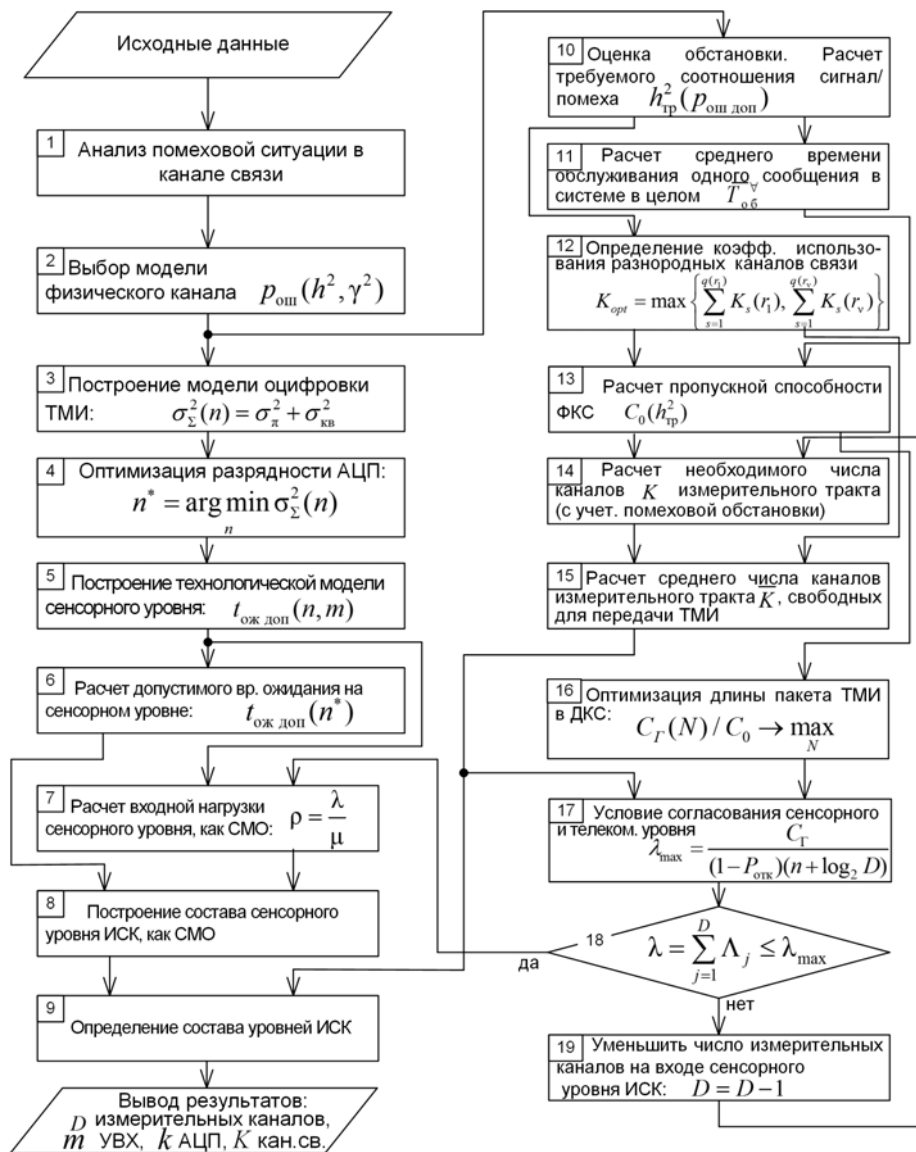


Рис. 3. Блок-схема алгоритма синтеза многоуровневой ИСК ТС КС СН (сенсорного и телекоммуникационного уровней)

1. Оптимизация разрядности АЦП с дальнейшим расчетом допустимого времени ожидания сигнала  $t_{\text{ож доп}}$  (блоки 4–6);

2. Обеспечение допустимой максимальной интенсивности заявок на входе сенсорного уровня ИСК (за счет числа подключаемых ИД), при которой ее пропускная способность не превысит гарантированную пропускную способность канала с помехоустойчивым кодированием (блоки 16–19) [18];

3. Расчет состава АЦП и УВХ, при котором выполняются требования к вероятностно-временным характеристикам (ВВХ) обслуживания заявок сенсорного уровня ИСК, а также обеспечивается согласование с телекоммуникационным уровнем ИСК по пропускной способности при заданной помехоустойчивости передачи ТМИ (блоки 6–9, 11).

Анализ помеховой ситуации (блок 1) сводится к инструментальному исследованию энергетических  $h^2$  и статистических  $\gamma^2$  характеристик сигналов и помех, результатом которого является выбор математической модели ФКС  $p_{\text{ош}}(h^2, \gamma^2)$  (блок 2).

Вероятности ошибок  $p_{\text{ош}}^r$   $r$ -ных разрядов двоичной кодовой комбинации ( $r = 1, n$ ) дифференцировано влияют на дисперсию канальной ошибки  $\sigma_{\pi}^2$ . Исследование данной зависимости, а также оценки влияния разрядности  $n$  на дисперсию суммарной ошибки восстановления элементов сообщения  $\sigma_{\Sigma}^2(n) = \sigma_{\pi}^2(n) + \sigma_{\text{кв}}^2(n, p_{\text{ош}})$  возможно при построении модели оцифровки ТМИ (блок 3). Минимизация суммарной дисперсии ошибки  $\sigma_{\Sigma}^2(n)$  позволяет определить оптимальное значение  $n^* = \arg \min_n \sigma_{\Sigma}^2(n)$ , которое рекомендуется при выборе разрядности АЦП (блок 4).

Построение модели сенсорного уровня (блок 5) позволяет установить зависимость времени ожидания заявки на обслуживание от параметров устройств преобразования сигнала: разрядности АЦП и технологических параметров УВХ.

При подстановке рекомендуемой разрядности  $n^*$  АЦП в формулу технологической модели сенсорного уровня ИСК рассчитывается допустимое время ожидания  $t_{\text{ож доп}}$ , при превышении которого появляется ошибка счета (блок 6).

Результаты построения технологической модели сенсорного уровня ИСК, в частности, среднее время разряда конденсатора УВХ, фактически являющееся временем обслуживания заявки  $t_p = 1/\mu$ , используются при расчете входной нагрузки СМО  $\rho = \lambda/\mu$  (блок 7). При этом интенсивность поступления заявок в систему  $\lambda$  зависит от количества измерительных каналов, подключенных к сенсорному уровню.

Расчет количества обслуживающих элементов  $k$  и мест ожидания в очереди  $m$  осуществляется при заданной в исходных данных допустимой вероятности отказа в обслуживании заявки  $P_{\text{отк доп}}$ . Более подробно порядок расчета необходимого числа каналов для значений  $m = \text{const}$

и  $k = \text{const}$  в системе координат  $\rho, \theta$ , где  $\rho = \lambda/\mu$ ,  $\theta = t_{\text{ож}} \mu$  для измерительного тракта ИСК представлен в [17, 19].

Координаты исходной точки  $x_n$  определяются реальной нагрузкой  $\rho_n$  на входе сенсорного уровня и нормированным ( $k$  средней продолжительности разряда конденсатора УВХ) допустимым временем ожидания  $\theta_{\text{доп}} = t_{\text{ож доп}} / \bar{t}_p$ .

Искомые количества УВХ  $m$  и АЦП  $k$  находятся с учетом  $m = \text{const}$  и  $k = \text{const}$ , ближайшем к исходной точке  $x_n$ , причем координаты рабочей точки  $x^*$  с координатами  $(p^*, \theta^*)$  должны соответствовать требованиям:  $\rho^* \geq \rho_n$ ;  $\theta^* \leq \theta_{\text{доп}}$ .

Блоки 7, 17 обеспечивают решение задачи согласования сенсорного уровня ИСК и каналов связи телекоммуникационного уровня по пропускным способностям.

С учетом заданного в исходных данных значения допустимой вероятности ошибки поэлементного приема  $p_{\text{ош доп}}$ . На основании выбранной модели ФКС  $p_{\text{ош}} = f(h^2, \gamma^2)$  осуществляется расчет требуемого значения энергетического параметра  $h_{\text{тп}}^2 = f^{-1}(p_{\text{ош доп}})$ , при котором обеспечивается условие  $p_{\text{ош}} \leq p_{\text{ош доп}}$  (блок 10).

Определение  $h^2$ , как отношение энергии сигнала (с мощностью  $P_c$ ) к энергии помех с суммарной мощностью  $P_n$ , наблюдаемых на интервале времени  $\tau_n$ , т.е.  $h^2 = P_c \tau_0 / P_n \tau_n$ , позволяет найти минимально допустимую длительность битового элемента сигнала, при котором  $h^2 \geq h_{\text{тп}}^2$ :  $\tau_0 = h_{\text{тп}}^2 P_n \tau_n / P_c$ . Пропускная способность ФКС, как максимальная скорость передачи ТМИ при допустимой  $p_{\text{ош доп}}$ , определяется количеством переданных битовых импульсов в единицу времени, т.е.  $C_0 = 1/\tau_0 = P_c / (P_n \tau_n h_{\text{тп}}^2)$  (блок 13).

При реализации в ДКС схемы обнаружения и стирания «пораженных» пакетов с повторной их передачей решается задача оптимизации длины пакета  $N$  с помехоустойчивым кодом. Целью данной задачи является определение гарантированной пропускной способности ДКС, максимально приближенной к пропускной способности ФКС, т.е.  $C_r(N) / C_0 \rightarrow \max_N$  (блок 16).

Приравняв значения пропускных способностей ДКС  $C_r$  и сенсорного уровня  $A_{\text{су}} = \lambda(1 - P_{\text{отк}}) \cdot (n + \log_2 D)$ , определяется условие их согласования в виде выражения для максимально допустимой интенсивности поступления заявок на обслуживание в сенсорный уровень (блок 17):  $\lambda_{\text{max}} = C_r / (1 - P_{\text{отк}}) \cdot (n + \log_2 D)$ .

Если реальная интенсивность заявок  $\lambda$  превышает значение  $\lambda_{\text{max}}$  (блок 18), то часть обработанных заявок с результатами измерения будет утеряна вследствие недостаточной пропускной способности ФКС. Для снижения нагрузки на входе сенсорного уровня с целью согласования с ДКС необходимо уменьшить число  $D$  измерительных каналов, по которым в систему поступают заявки на обслуживание (блок 19).

Если условие  $\lambda = \sum_{j=1}^D \Lambda_j \leq \lambda_{\text{max}}$  блока 18 выполняется, то все обработанные ТМИ будут переданы по измери-

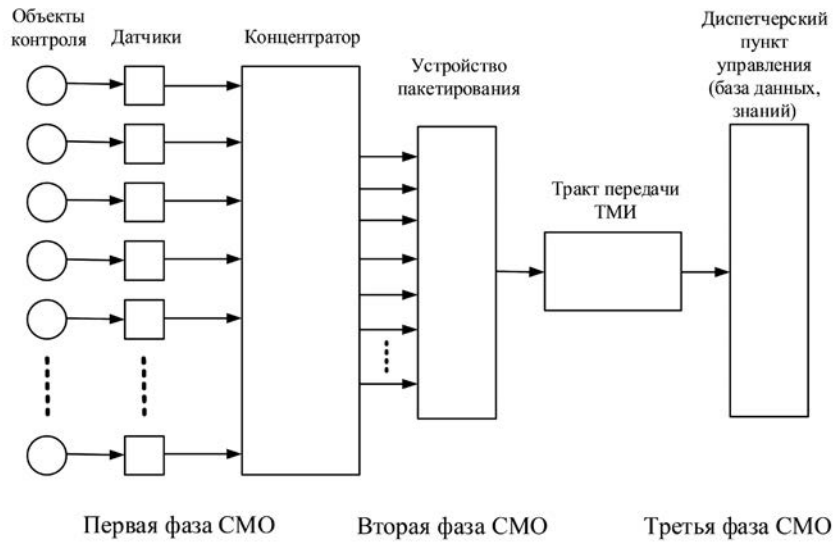


Рис. 4. Структура ИСК на примере трехфазной СМО

тельному тракту ИСК, а реальное значение интенсивности заявок  $\lambda$  используется для расчета входной нагрузки сенсорного уровня (блок 7). При этом значение числа  $D$  измерительных каналов совместно с количествами  $m$  УВХ и  $k$  АЦП в качестве конечного результата выводятся на отображающих устройствах.

Структура метода синтеза ИСК ТС КС, представленная алгоритмом на рис. 3, содержит следующие операции: а) адаптация области допусков; б) обеспечение допустимой максимальной интенсивности заявок (чем достигается также повышение достоверности контроля) на входе сенсорного уровня (за счет подключения дополнительных ИД), при которой ее пропускная способность не превысит гарантированную пропускную способность канала с помехоустойчивым кодированием (приемлемая избыточность); в) расчет состава сенсорного уровня ИСК, при котором выполняются требования к ВВХ обслуживания заявок на сенсорном уровне ИСК, а также обеспечивается согласование с каналами по пропускной способности при заданной помехоустойчивости передачи ТМИ; г) расчет состава телекоммуникационного уровня, при котором выполняются требования по помехоустойчивой передаче ТМИ, с учетом возможности использования разнородных каналов связи представлен в [20].

В целом, структурный состав многоуровневой ИСК представляет трехфазную СМО с очередью, ограниченной количествами мест ожиданий применительно к каждому уровню ИСК: реверсивных регистров, устройств выборки и хранения — на сенсорном уровне; устройство пакетирования ТМИ, процессор — на телекоммуникационном уровне; регистров буфера памяти (базы данных) — на

диспетчерском уровне ИСК, что в упрощенном виде представлено на рис. 4.

Задача оптимизации состава ИСК относится к ряду многокритериальной, поиск решения которой осуществляется в области компромиссов: максимизация пропускной способности при ограниченных временных и стоимостных ресурсах. Учитывая мультипликативность целевой функции, данная задача решается с использованием модифицированного метода динамического программирования, реализующего прямую прогонку.

С учетом рассмотренных выше особенностей построения, структурный состав многоуровневой ИСК можно представить в виде рис. 5.

### Заключение

В данной работе рассматриваются расширение классических подходов к процессам контроля ТС территориально-распределенных КС СН. Развитие телекоммуникационных систем, как контролируемых объектов, характеризующих новыми свойствами, предполагают разработку новых подходов в процессах контроля их ТС, разработку новых систем, учитывающих не только особенности ОК, но и воздействие дестабилизирующих факторов в процессе их функционирования.

Анализируются ключевые элементы для реализации интеллектуального контроля. В результате синтеза многоуровневой ИСК предложена архитектура системы, позволяющей определить наиболее рациональное соотношение измерительных каналов (датчиков, АЦП, УВХ), с учетом помехоустойчивости и пропускной способности измерительных трактов, а необходимого числа каналов

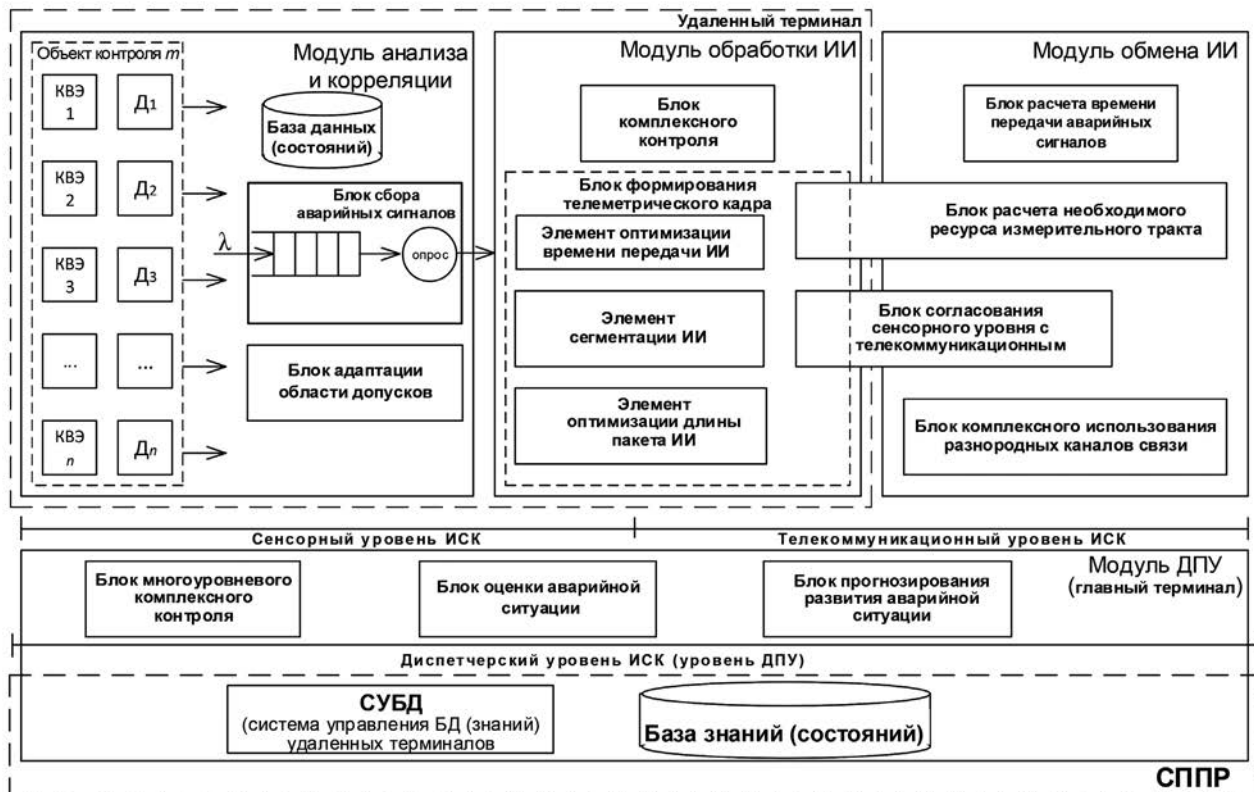


Рис. 5. Структура интеллектуальной системы контроля ТС КС

связи. Эта архитектура учитывает анализ собранных данных (аварийных сигналов) на сенсорном уровне системы и онлайн-анализ потоковых данных (телеметрических сообщений) для оперативного обнаружения возникновения возможных отказов, прогнозирования остаточного ресурса оборудования КС СН. В краткосрочной перспективе развитие систем контроля ТС КС СН будет неразрывно связано с базовыми технологиями машинного обучения, сквозными технологиями искусственного интеллекта, технологиями извлечения знаний из различных стационарных и мобильных источников, технологиями управления целенаправленным поведением в неструктурированных динамических средах, технологиями когнитивного анализа данных, мультиагентного управления и диспетчеризации ресурсов в распределенных мобильных системах, методах предобработки и интеллектуального анализа больших данных результатов измерений, без учета которых контроль ТС эволюционирующих телекоммуникационных систем будет затруднен.

### Литература

1. Зацаринный А.А., Шабанов А.П. Технология информационной поддержки деятельности организационных систем на основе ситуационных центров. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2015. 232 с.: ил.

2. Сай Ван Квонг, Щербаков М.В. Архитектура системы предсказательного технического обслуживания сложных многообъектных систем в концепции Индустрии 4.0 // Software & Systems. 2020. № 2 (33). С. 186–194. DOI: 10.115827/0236–235X.130.186–194

3. Пузанков Д.В., Мирошников В.И., Пантелеев М.Г., Серегин А.В. Интеллектуальные агенты, многоагентные системы и семантический Web: концепции, технологии, приложения. СПб.: Технолит, 2008. 292 с.

4. Абрамов О.В., Розенбаум А.Н. Управление эксплуатацией систем ответственного назначения. Владивосток: Дальнаука, 2000. 200 с.

5. Ионов С.В., Лихачев А.М., Сборцев А.С., Кузнецов В.Е. Новые технологии построения технических систем электросвязи. М.: МО РФ, 2002. 442 с.

6. Егоршев С.М., Малыгин И.Г., Комашинский В.И., Аванесов М.Ю. Предложения по стратегии развития технологий искусственного интеллекта в транспортной отрасли России // Информация и космос. 2020. № 2. С. 56–61.

7. Масленников О.В., Алиев Ф.К., Вассенков А.В., Тляшев О.М. Интеллектуализация — важная составляющая цифровизации Вооруженных Сил Российской Федерации // Военная мысль. 2020. № 7. С. 67–76.

8. Budko P.A., Fedorenko V.V., Vinogradenko A.M., Samoylenko V.V., Pedan A.V. Approach to the intellectual monitoring of the technical condition of difficult dynamic objects on the basis of the systems of a polling // Proc. of the 22nd International conference «Distributed





computer and communication networks: control, computation, communications» (DCCN-2019) (Moscow, Russia, 23–27 September 2019). Springer, Cham., 2019. CCIS, Vol. 1141. Pp. 560–573. DOI: 10.1007/978-3-030-36625-4\_45

9. Лоскутов А. И., Ряхова Е. А., Горбулин В. И. Концептуальная модель технического диагностирования бортовой аппаратуры автономных космических аппаратов на основе оптимальной реконфигурации в условиях априорной неопределенности появления неисправностей // Информационно-измерительные системы и управляющие системы. 2020. Т. 18. № 3. С. 43–55. DOI: 10.18127/j20700814-202003-05

10. Budko P.A., Vinogradenko A.M., Mezhenov A.V., Zhuravlyova N.G. Method of adaptive control of technical states of radio-electronic systems // Advances in Signal Processing. Theories, Algorithms, and System Control, Intelligens Systems Reference Library. Springer-Verlag, 2020. Vol. 184. Chapter 11. Pp. 137–151. DOI:org/10.1007/978-3-030-40312-6

11. Винограденко А. М., Будко Н. П. Адаптивный контроль технического состояния сложных технических объектов на основе интеллектуальных технологий // Т-Comm. Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. № 1. С. 25–36. DOI: 10.36724/2072-8735-2020-4-1-25-35

12. Будко П. А., Будко Н. П., Винограденко А. М. Способы повышения помехоустойчивости в автоматизированных системах контроля // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 2. С. 176–211. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10206

13. Fedorenko V.V., Kononov Y.G., Vinogradenko A.M., Samoylenko V.V., Samoylenko I.V. The time-probability characteristics of a telemetry signal with the variable number of bits // Proc. of the 2017 IEEE II International Conference on Control in Technical Systems (CTS) (St. Petersburg, Russia, 25–27 Oct. 2017). St. Petersburg

Electrotechnical University Publ., 2017. Pp. 146–149. DOI: 10.1109/CTSYS.2017.8109511

14. Вишневецкий В. М., Семенова О. В. Системы поллинга: теория и применение в широкополосных и беспроводных сетях. М.: Техносфера, 2007. 312 с.

15. Маликова Е. Е., Цитович И. И. Стратегия группового поллинга в широкополосных беспроводных сетях мониторинга // Обозрение прикладной и промышленной математики. 2010. Т. 17. № 2. С. 284–285.

16. Vinogradenko A.M., Budko P.A., Fedorenko V.V. Adaptive System Monitoring of the Technical Condition Technological Objects Based on Wireless Sensor Networks // Proc. of the 2018 III International scientific Conference, (Convergent'2018) (Moscow, Russia, 29 November–2 December, 2018). Springer, Cham., 2018. CCIS, Vol. 1140 Pp. 200–210. DOI: 10.1007/978-3-030-37436-5 18

17. Федоренко В. В., Федоренко И. В., Сукманов А. В. Модели поэтапного формирования пакетов телеметрической информации // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2014. № 10. С. 39–43.

18. Патент РФ № 2425444 С1. Адаптивная радиолния передачи дискретной информации / Федоренко В. В., Рачков В. Е., Винограденко А. М. Заявл.: 23.11.2009. Оpubл.: 27.07.2011. Бюл. № 21. 8 с.

19. Винограденко А. М. Способ расчета необходимого числа каналов в многоканальной линии связи // Техника средств связи. СПб.: Интелтех, 2013. С. 79–82.

20. Будко П. А., Винограденко А. М., Литвинов А. И. Реконфигурация каналов связи при управлении смешанными группировками робототехнических комплексов // Известия ЮФУ. 2017. № 2 (187). С. 266–278. DOI: 10.18522/2311-3103-2017-1-266278

## METHOD OF SYNTHESIS OF INTELLIGENT SYSTEMS FOR CONTROL OF TECHNICAL CONDITION OF GEOGRAPHICALLY DISTRIBUTED COMMUNICATION COMPLEXES OF SPECIAL PURPOSE

**ALEKSEY M. VINOGRADENKO,**

St. Petersburg, Russia, vinogradenko.a@inbox.ru

**KEYWORDS:** intelligent monitoring system; communication systems; sensors; measurement information; monitored parameters; alarms.

### ABSTRACT

The work is devoted to the development of an intelligent control system for geographically distributed communications systems of special purpose. The relevance of the study is caused by the fact that the evolutionary development of controlled telecommunications systems, on the example of special-purpose communication complexes characterized by a changing nature, application conditions in the course of their operation, large coverage and territorial distribution,

structural, topological, as well as space-time heterogeneity should be taken into account and correlated with systems for monitoring their technical condition, taking into account the development of basic artificial intelligence technologies, which is conceptually important in the short term. Method of synthesis of intelligent control system characterized by multilevel architecture of construction and functioning, depending on the degree of emergency situation, in modes

of express and complete control is presented, which involves use of databases (knowledge) and adaptation of control processes to the effects of destabilizing factors. The work shows the approach to processes of proactive inspection of parameters of objects, consists in adaptive adjustment of preventive tolerances for checked parameters and use of adaptive mechanisms for polling intelligent sensors based on polling models; taking into account the correlation of actuation of a group of sensors within the control object in emergency situations and contributing to an increase in the speed of recording and transmitting the alarm signal, and reducing redundancy of measurement information in the measurement path of the monitoring system. As a result of the synthesis of a multilevel intelligent control system, the system architecture is proposed, which allows determining the most rational ratio of measuring channels (intelligent sensors, analog-to-digital converters, sampling and storage devices), taking into account the noise immunity and throughput of measuring paths, as well as the required number of communication channels. The multi-level monitoring system architecture allows analysis of measuring information (alarms) at the sensor level of the system and online analysis of streaming data (telemetry messages) to quickly detect cases of possible failures, predict the residual resource of equipment of special-purpose communication systems.

## REFERENCES

- Zatsarinnyy A.A., Shabanov A.P. *Tehnologiya informatsionnoy podderzhki deyatelnosti organizatsionnih system na osnove situatsionnih tsentrov* [Information support technology for organizational systems based on situation centres]. Moscow: Torus Press Publ., 2015. 232 p. (In Rus)
- Van Cuong Sai, Shcherbakov M.V. Architecture of predictive maintenance system of complex multi-object systems in Industry 4.0 concept. *Software & Systems*. 2020. No. 2 (33). Pp. 186-194. DOI: 10.115827/0236-235X.130.186-194 (In Rus)
- Puzankov D.V., Mirishnikov V.I., Pantelev M.G., Seregin A.V. *Intellektualnie agenti, mnogoagentnie sistemi i semanticheskii Web: kontseptsii, tehnologii, prilozheniya*. [Intelligent agents, multi-agent systems, and the semantic Web: concepts, technologies, and applications]. Saint Petersburg: Tehnolit Publ., 2008. 292 p. (In Rus)
- Abramov O.V., Rozenbaum A.N. *Upravlenie ekspluatatsiyey system otvetstvennogo naznacheniya* [Managing the operation of responsible purpose systems]. Vladivostok: Dal'nauka Publ., 2000. 200 p. (In Rus)
- Ionov S.V., Lihachev A.M., Sbornov A.S., Kuznetsov V.E. *Novie tehnologii postroeniya tehnikeskikh system electrosvyazi* [New technologies for building technical telecommunication systems]. Moscow: Ministry of Defence of the Russian Federation Publ., 2002. 442 p. (In Rus)
- Egorshv S.M., Maligin I.G., Komashinskiy V.I., Avanesov M.Y. Suggestions for the development strategy of artificial intelligence technologies in the transport industry of Russia. *Information and Space*, 2020. No. 2. Pp. 56-61. (In Rus)
- Maslennikov O.V., Aliev F.K., Vassenkov A.V., Tlyashev O.M. Intellectualization as a major constituent of digitalization in the armed forces of the Russian Federation. *Military thought*. 2020. No. 7. Pp. 67-76. (In Rus)
- Budko P.A., Fedorenko V.V., Vinogradenko A.M., Samoilenko V.V., Pedan A.V. Approach to the intellectual monitoring of the technical condition of difficult dynamic objects on the basis of the systems of a polling]. *Proc. of the 22nd International conference «Distributed computer and communication networks: control, computation, communications» (DCCN-2019)*, Moscow, Russia, 23-27 September 2019. Springer, Cham. Vol. 1141. Pp. 560-573. DOI: 10.1007/978-3-030-36625-4\_45
- Loskutov A.I., Ryahova E.A., Gorbun V.I. A conceptual model for technical diagnostics of onboard equipment of Autonomous spacecraft based on optimal reconfiguration in conditions of a priori uncertainty of fault occurrence. *Information and measurement systems and control systems*. 2020. Vol. 18. No. 3. Pp. 43-55. DOI: 10.18127/j20700814-202003-05 (In Rus)
- Budko P.A., Vinogradenko A.M., Mezhenov A.V., Zhuravlyova N.G. Method of adaptive control of technical states of radio-electronic systems. *Advances in Signal Processing. Theories, Algorithms, and System Control, Intelligens Systems Reference Library*. Springer-Verlag, 2020. Vol. 184. Chapter 11. Pp. 137-151. DOI: org/10.1007/978-3-030-40312-6
- Vinogradenko A.M., Budko N.P. Adaptive control of the technical condition of complex technical objects based on intelligent technologies. *T-Comm*. 2020. Vol. 14. No. 1. Pp. 25-36. DOI: 10.36724/2072-8735-2020-4-1-25-35 (In Rus)
- Budko P.A., Budko N.P., Vinogradenko A.M. Ways to increase noise immunity in automated control systems. *Systems of Control, Communication and Security*. 2020. No. 2. Pp. 176-211. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10206 (In Rus)
- Fedorenko V.V., Kononov Y.G., Vinogradenko A.M., Samoilenko V.V., Samoilenko I.V. The time-probability characteristics of a telemetry signal with the variable number of bits. *Proc. of the 2017 IEEE II International Conference on Control in Technical Systems (CTS)*, St. Petersburg, Russia, 25-27 Oct. 2017. Saint Petersburg Electrotechnical University Publ., 2017. Pp. 146-149. DOI: 10.1109/CTS.2017.8109511
- Vishnevskiy V.M., Semyonova O.V. *Sistemi pollinga: teoriya i primeneniye v shirokopolosnih i besprovodnih setyah* [Polling systems: theory and application in broadband and wireless networks]. Moscow: Tehnosfera Publ., 2007. 312 p. (In Rus)
- Malikova E.E., Tsitovich I.I. Strategiya gruppovogo pollinga v shirokopolosnih besprovodnih setyah monitoringa [Group polling strategy in broadband wireless monitoring networks]. *Obozrenie prikladnoi i promyshlennoi matematiki* [Review of applied and industrial mathematics]. 2010. Vol. 17. No. 2. Pp. 284-285. (In Rus)
- Vinogradenko A.M., Budko P.A., Fedorenko V.V. Adaptive System Monitoring of the Technical Condition Technological Objects Based on Wireless Sensor Networks. *Proc. of the 2018 III International scientific Conference, (Convergent'2018)*, Moscow, Russia, 29 November – 2 December, 2018. Springer, Cham., 2018. CCIS, Vol. 1140. Pp. 200-210. DOI: 10.1007/978-3-030-37436-5 18



17. Fedorenko V.V., Fedorenko I.V., Sukmanov A.V. Models of step-by-step formation of telemetric information packages. *Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz' v neftyanoy promyshlennosti* [Automation, telemekhanization and communication in the oil industry]. 2014. No. 10. Pp. 39-43. (In Rus)
18. Patent RF 2425444. Adaptivnaya radioliniya peredachi diskretnoy informatsii [Adaptive radio link for transmitting discrete information]. Fedorenko V.V., Rachkov V.E., Vinogradenko A.M. Declared 23.11.2009. Published 27.07.2011. Bulletin No. 21. 8 p. (In Rus)
19. Vinogradenko A.M. Sposob rascheta neobhodimogo chisla kanklov v mnogokanalnoy linii svyazi [Method for calculating the required

- number of channels in a multi-channel communication line]. *Tekhnika sredstv svyazi* [Communication equipment]. 2013. Pp. 79-82. (In Rus)
20. Budko P.A., Vinogradenko A.M., Litvinov A.I. Reconfiguration of communication channels for managing mixed groups of robotic complexes. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2017. Vol. 187. No. 2. Pp. 266-278. DOI: 10.18522/2311-3103-2017-1-266278 (In Rus)

#### INFORMATION ABOUT AUTHOR:

Vinogradenko A.M., PhD, Docent, Doctoral Candidate Military academy of communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny.

**For citation:** Vinogradenko A.M. Method of synthesis of intelligent systems for control of technical condition of geographically distributed communication complexes of special purpose. *H&ES Research*. 2020. Vol. 12. No. 4. Pp. 24-35. doi: 10.36724/2409-5419-2020-12-4-24-35 (In Rus)



## НПЦ ИРС

Научно-производственный центр  
Информационных региональных систем

▶ [npcirs.ru](http://npcirs.ru)

Закрытое акционерное общество "Научно-производственный центр информационных региональных систем" является предприятием, разрабатывающим автоматизированные системы специального назначения.

#### Основными направлениями нашей деятельности являются:

- проектирование, создание и ремонт автоматизированных систем управления и их составных частей, систем обработки данных, программного обеспечения, информационных систем для государственных организаций и коммерческих компаний;
- разработка общесистемного и прикладного ПО, внедрение и сопровождение информационных систем;
- защита информации в системах управления, локальных вычислительных сетях, программно-аппаратных комплексах, телекоммуникационных системах;
- производство и поставка технических средств, в офисном и защищенном исполнении;
- создание, внедрение и сопровождение оперативных и учетных систем любой сложности;
- анализ автоматизированных систем на предмет разработки к ним классификаторов и нормативно-справочной информации;
- разработка проектов и создание глобальных, корпоративных, локальных телекоммуникационных систем и структурированных кабельных сетей.

Создаваемые предприятием средства (комплексы средств автоматизации, программные и программно-информационные комплексы, информационные изделия) эксплуатируются в различных государственных органах: в органах военного управления Министерства обороны РФ, а также на предприятиях, в организациях, в органах местного самоуправления субъектов РФ, занимающихся воинским учетом.

Научные исследования в сфере КНСИ позволяют нам качественно анализировать автоматизированные системы и разрабатывать к ним классификаторы и нормативно-справочную информацию.



НПЦ ИРС

Научно-производственный центр  
Информационных региональных систем  
▶ [npcirs.ru](http://npcirs.ru)

Телефон: 8(800)100-40-90  
E-mail: [administrator@npcirs.ru](mailto:administrator@npcirs.ru)



doi: 10.36724/2409-5419-2020-12-4-36-43

# УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ЗАДЕРЖЕК РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛОВ В ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ

**КОЛМОГОРОВ****Олег Викторович<sup>1</sup>****ДЕЙКУН****Анна Васильевна<sup>2</sup>****ЧЕМОСОВА****Екатерина Владимировна<sup>3</sup>****АННОТАЦИЯ**

Представлены результаты разработки установки для измерений задержек распространения сигналов в оптических элементах и световодах. Измерения задержек распространения сигнала в оптических элементах и световодах требуются при разработке различной аппаратуры, в частности, при разработке волоконно-оптических систем синхронизации шкал времени для комплексов метрологического обеспечения глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС и измерительных средств наземного комплекса ГЛОНАСС, при разработке средств метрологического обеспечения волоконно-оптических систем связи, при разработке радиопотонных систем (например, фазированных антенных решеток с оптоволоконными каналами, измерительных систем с удаленными антеннами). Показано, что установка позволяет реализовать фазовый и импульсный методы измерений задержек распространения сигнала, вносимых оптическими элементами, а также модифицированный импульсный метод, разработанный для определения задержек в оптических элементах с большим ослаблением сигнала, когда точность измерений другими методами снижается из-за возрастания влияния шумов измерительной аппаратуры. Разработанный метод основан на регистрации формы импульсов с помощью аналого-цифрового преобразователя, аппроксимации зарегистрированных данных с учетом информации об исходной форме импульсов с целью уменьшения случайной погрешности, вызванной влиянием шумов, и последующем определении временных характеристик импульсов с использованием параметров аппроксимирующих функций. Рассмотрено применение разработанного метода для различных форм импульсов лазерного излучения, приведена схема установки, реализующей данные методы, а также приведены результаты экспериментальных исследований установки. Показано, что модифицированный импульсный метод позволяет уменьшить погрешность измерений задержек распространения сигнала в световодах и оптических элементах на 15–20 % и более, в зависимости от вносимого ослабления, а установка для измерений задержек распространения сигнала может быть использована при контроле характеристик световодов и оптических элементов различных волоконно-оптических систем.

**Сведения об авторах:**

<sup>1</sup>к.т.н., начальник лаборатории Всероссийского научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений, г. Солнечногорск, р.п. Менделеево, Россия, kolmogorov@vniiftri.ru

<sup>2</sup>инженер-геодезист Всероссийского научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений, г. Солнечногорск, р.п. Менделеево, Россия, anna@vniiftri.ru

<sup>3</sup>студент МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Россия, dobro\_k@list.ru

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** измерительная установка; оптический импульс; оптический элемент; аппроксимация; погрешность; задержка распространения сигнала.

**Для цитирования:** Колмогоров О.В., Дейкун А.В., Чемосова Е.В. Установка для измерений задержек распространения сигналов в оптических элементах // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2020. Т. 12. № 4. С. 36–43. doi: 10.36724/2409-5419-2020-12-4-36-43

## Введение

Измерения задержек распространения сигнала в оптических элементах и световодах требуются при разработке различной оптико-электронной аппаратуры, в частности, оптических систем передачи эталонных сигналов частоты и времени к комплексам метрологического обеспечения глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС [1], систем сравнения шкал времени пространственно удаленных эталонов [2], лазерных дальномерных систем, оптических линий задержки [3], оптических рефлектометров [4], многоканальных радиофотонных систем (например, фазированных антенных решеток с оптическими каналами, систем для измерений параметров электромагнитного поля с комплектами распределенных в пространстве датчиков, применяемых для определения диаграммы направленности антенн) [5–12]. В свою очередь, уровень технических характеристик указанной аппаратуры зависит от точности контроля и учета задержек распространения сигналов в оптических элементах и световодах.

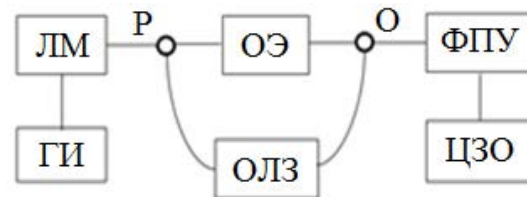
Разработанная установка для измерений задержек распространения сигналов в оптических элементах позволяет реализовать фазовый и импульсный методы измерений задержек [13], вносимых оптическими элементами. Фазовый метод позволяет достичь высокой точности, однако обладает весомым недостатком — сложностью применения для сигналов с малой амплитудой. Его использование требует высокого отношения сигнал/шум на входе приемной аппаратуры, что не всегда возможно обеспечить или ведет к значительному усложнению аппаратуры. Импульсный метод, основанный на измерении интервалов времени между импульсами на входе и выходе исследуемого оптического элемента, прост в реализации и может применяться в более широком динамическом диапазоне сигналов, однако имеет меньшую точность. При использовании этого метода с помощью измерителей временных интервалов (ИВИ) регистрируются моменты поступления импульсов на вход ИВИ по заданному пороговому значению уровня входного сигнала (уровню запуска триггера) и измеряется интервал между ними. Основными составляющими погрешности измерений временных интервалов между импульсами являются погрешность частоты опорного генератора ИВИ, шумы в приемном тракте, погрешности внутреннего триггера аппаратуры, а также погрешность дискретизации. Уменьшение первой составляющей возможно за счет калибровки опорного генератора или использования более точного источника сигнала опорной частоты. Для уменьшения влияния остальных составляющих и повышения точности измерений задержек сигнала в оптических элементах при разработке установки предложено реализовать модифицированный импульсный метод, основанный на регистрации формы оптических импульсов с помощью аналого-цифрового преобразователя с установ-

ленным на входе фотоприемным устройством, последующей аппроксимации зарегистрированных данных с учетом информации об исходной форме импульса и определении измеренного значения интервала времени между импульсами с использованием вычисленных параметров аппроксимирующих функций. Особенность предложенного метода состоит в том, что для определения интервала времени между двумя импульсами используется не два единичных отсчета, а два массива зарегистрированных данных, несущих информацию о форме импульсов. Для уменьшения случайных погрешностей эти данные подвергаются сглаживанию путем математической обработки.

## Схема и принцип действия измерительной установки

Структурная схема установки для измерений задержек распространения сигналов представлена на рис. 1.

Установка состоит из генератора импульсов ГИ, лазерного модуля ЛМ, оптоволоконного разветвителя Р, оптической линии задержки ОЛЗ (оптическое волокно длиной несколько метров), оптоволоконного объединителя О и цифрового запоминающего осциллографа ЦЗО с фотоприёмным устройством ФПУ. Измерительная установка функционирует следующим образом. С генератора импульсов ГИ на лазерный модуль ЛМ подается запускающий электрический импульс. Оптический импульс с лазерного модуля ЛМ поступает на вход разветвителя Р, который распределяет оптическое излучение по двум каналам. Первый канал (измерительный) через объединитель О соединяется с входом ФПУ. Исследуемый оптический элемент ОЭ при измерениях устанавливается в первый канал между разветвителем Р и объединителем О. Второй канал (опорный) содержит оптическую линию задержки (ОЛЗ), предназначенную для внесения начальной задержки между импульсами, поступающими на ФПУ по двум каналам. Осциллограф с ФПУ регистрирует два импульса:



**Рис. 1.** Схема установки для измерений задержек распространения сигналов в световодах и оптических элементах: ГИ — генератор импульсов; ЛМ — лазерный модуль; ОЭ — оптический элемент; ОЛЗ — оптическая линия задержки; ФПУ — фотоприемное устройство; ЦЗО — цифровой запоминающий осциллограф

импульс, пришедший напрямую по каналу 1 и импульс, пришедший по каналу 2 через ОЛЗ. Зарегистрированные осциллографом данные сохраняются в файл для последующей математической обработки с целью вычисления значения интервалов времени между импульсами.

Измерения задержки распространения сигнала в оптическом элементе проводятся в два этапа. На первом этапе определяется разность задержек, вносимых двумя каналами установки, при этом исследуемый оптический элемент ОЭ в схему установки не включается, а разветвитель Р напрямую подключается к объединителю О. Оптический импульс, излученный с ЛМ, поступает на ФПУ по двум каналам, при этом ЦЗО с ФПУ регистрирует два импульса, интервал времени  $T_{ref}$  между которыми представляет собой разность задержек, вносимых двумя каналами установки. На втором этапе в измерительный канал установки включается исследуемый оптический элемент ОЭ и измеряется интервал времени  $T_{meas}$  между оптическими импульсами, поступающими на вход ФПУ. Пример осциллограмм, полученных на первом и втором этапах, приведен на рис. 2.

Далее вычисляется разность между значениями интервалов времени  $T_{meas}$  и  $T_{ref}$ , значение которого равно значению задержки распространения сигнала  $T_{oel}$ , вносимой исследуемым оптическим элементом по формуле (1):

$$T_{oel} = T_{ref} - T_{meas} \quad (1)$$

Зарегистрированные осциллографом данные, характеризующие форму оптических импульсов, представляют собой последовательность дискретных по времени и уровню отсчетов. При регистрации оптических импульсов на регистрирующую аппаратуру (цифровой осциллограф и ФПУ) неизбежно воздействуют шумы, которые вносят случайную погрешность в результаты измерений интервалов време-

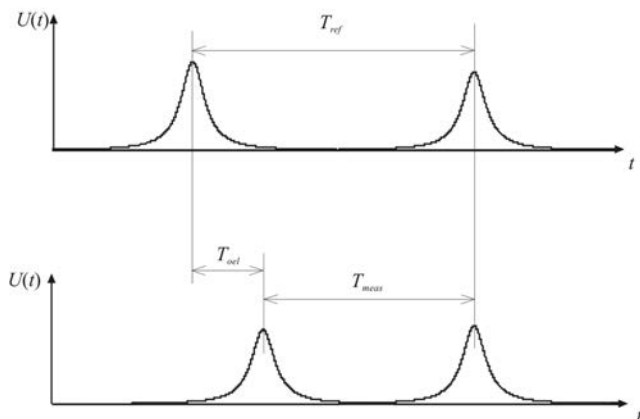


Рис. 2. Осциллограммы импульсов, регистрируемых на первом этапе измерений (без исследуемого оптического элемента) и на втором этапе (с оптическим элементом)

ни. Наиболее существенно это влияние проявляется при регистрации момента приема импульса по единственному пороговому значению на нарастающем фронте импульса. Для уменьшения случайной погрешности предлагается использовать аппроксимацию данных о зарегистрированной форме всего импульса, что позволит за счет избыточности данных провести их сглаживание, тем самым уменьшив влияние шумов. При этом в качестве значения интервала времени между импульсами будем принимать разность моментов времени между максимумами «сглаженных» зависимостей, описывающих форму импульсов.

В составе измерительной установки могут быть использованы лазерные модули и импульсные лазеры различных типов. Типичными формами импульсов для ряда импульсных лазеров является гауссовский импульс и лоренцевский импульс [14]. В зависимости от формы импульса лазера, используемого в составе установки, для зарегистрированных осциллограмм следует выбирать соответствующие аппроксимирующие функции (функцию Гаусса и функцию Лоренца).

### Метод аппроксимации формы оптического импульса

Аппроксимация экспериментальных данных предполагает определение таких параметров аппроксимирующей функции, при которых она наилучшим образом (по заранее выбранному критерию) соответствует имеющимся экспериментальным данным.

Для определения параметров аппроксимирующей функции широко используется метод наименьших квадратов, однако для функций сложной формы (в т.ч. гауссовской и лоренцевской) его прямое применение затруднительно и ведет к неприемлемым затратам времени при обработке результатов эксперимента. В таких случаях целесообразно применять итерационные методы, использующие последовательное уточнение значений коэффициентов аппроксимирующей функции путем вычисления поправок к приближенным значениям этих коэффициентов.

Используем итерационный метод для аппроксимации формы лоренцевского оптического импульса по цифровым отсчетам зарегистрированной осциллограммы. При этом в качестве функциональной зависимости рассмотрим зависимость напряжения от времени  $U(t)$ , регистрируемую осциллографом с ФПУ и характеризующую мгновенную оптическую мощность в импульсе. В этом случае аппроксимирующая функция будет иметь вид [14]:

$$U_L(U_0, t_0, \tau) = 1 / (1 + 4(t_i - t_0)^2 / \tau^2) \cdot U_0,$$

где  $U_L(U_0, t_0, \tau)$  — функция Лоренца;  
 $U_0$  — амплитудный коэффициент;

$t_0$  — координата максимума;  
 $\tau$  — параметр, характеризующий длительность импульса.

Для параметров аппроксимирующей функции примем обозначения:  $U_0 = \alpha_1$ ,  $t_0 = \alpha_2$ ,  $\tau = \alpha_3$ . При использовании итерационного метода параметры аппроксимирующей функции  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  определяются путем вычисления поправок к их начальным значениям  $\alpha_{10}$ ,  $\alpha_{20}$ ,  $\alpha_{30}$  методом наименьших квадратов.

Поправки  $\delta\alpha_1$ ,  $\delta\alpha_2$ ,  $\delta\alpha_3$  для уточнения начальных значений параметров аппроксимирующей функции определяются путем решения системы уравнений (2):

$$\begin{cases} a_{11} \cdot \delta\alpha_1 + a_{12} \cdot \delta\alpha_2 + a_{13} \cdot \delta\alpha_3 = b_1, \\ a_{21} \cdot \delta\alpha_1 + a_{22} \cdot \delta\alpha_2 + a_{23} \cdot \delta\alpha_3 = b_2, \\ a_{31} \cdot \delta\alpha_1 + a_{32} \cdot \delta\alpha_2 + a_{33} \cdot \delta\alpha_3 = b_3. \end{cases} \quad (2)$$

Для расчета коэффициентов  $a_{11}$ ,  $a_{12}$ , ...,  $a_{33}$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  используются экспериментальные данные  $U(t_i)$ , значения функции  $U_i = U_L(U_0, t_0, \tau)$ , вычисленные в точках  $t_i$  ( $i = 1 \dots N$ ,  $N$  — количество отсчетов) с использованием приближенных коэффициентов, а также значения частных производных этой функции в указанных точках по формулам:

$$A_i = \left. \frac{\partial U}{\partial U_0} \right|_{t=t_i} = 1 / \left( 1 + 4(t_i - t_0)^2 / \tau^2 \right);$$

$$B_i = \left. \frac{\partial U}{\partial t_0} \right|_{t=t_i} = U_0 \cdot \frac{8\tau^3 (t_i - t_0)}{\left( 1 + 4(t_i - t_0)^2 \right)^2};$$

$$C_i = \left. \frac{\partial U}{\partial \tau} \right|_{t=t_i} = \frac{8U_0\tau(t_i - t_0)^2}{\left( \tau^2 + 4(t_i - t_0)^2 \right)^2}.$$

Коэффициенты  $a_{11}$ ,  $a_{12}$ , ...,  $a_{33}$  определяются по следующим формулам:

$$a_{11} = \sum_{i=1}^N A_i^2; \quad a_{12} = \sum_{i=1}^N (A_i \cdot B_i);$$

$$a_{13} = \sum_{i=1}^N (A_i \cdot C_i); \quad a_{21} = \sum_{i=1}^N (A_i \cdot B_i);$$

$$a_{22} = \sum_{i=1}^N B_i^2; \quad a_{23} = \sum_{i=1}^N (B_i \cdot C_i);$$

$$a_{31} = \sum_{i=1}^N (A_i \cdot C_i); \quad a_{32} = \sum_{i=1}^N (B_i \cdot C_i);$$

$$a_{33} = \sum_{i=1}^N C_i^2.$$

Уточненные значения параметров функций  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  определяются по формулам:

$$\alpha_1 = \alpha_{10} + \delta\alpha_1;$$

$$\alpha_2 = \alpha_{20} + \delta\alpha_2;$$

$$\alpha_3 = \alpha_{30} + \delta\alpha_3.$$

Далее в качестве приближенных значений коэффициентов аппроксимирующей функции принимаются  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  и цикл вычислений повторяется до тех пор, пока значения поправок не станут меньше заранее выбранного малого значения.

В качестве начальных значений параметров аппроксимирующей функции  $\alpha_1$  и  $\alpha_3$  целесообразно выбирать значение амплитуды, соответствующее пику мощности импульса, и значение длительности импульса по уровню 0,5 от максимума. Для определения начального значения параметра  $t_0$ , обеспечивающего наилучшее приближение функции к экспериментальным данным, следует использовать несколько значений в окрестности пика импульса, для каждого из них провести цикл итераций и расчет суммы квадратов отклонений значений аппроксимирующей функции от экспериментальных данных. В качестве начального значения параметра  $t_0$  следует принять то, при котором сумма квадратов отклонений минимальна.

В случае использования гауссовских оптических импульсов для аппроксимации экспериментальных данных целесообразно применять итерационный метод [15], предусматривающий использование в качестве аппроксимирующей зависимости функции Гаусса с амплитудным коэффициентом по формуле:

$$\begin{aligned} U(t, t_m, \sigma) &= k_a \cdot U_G(t, t_m, \sigma) = \\ &= k_a \cdot \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-t_m}{\sigma}\right)^2}, \end{aligned}$$

где  $k_a$  — амплитудный коэффициент;

$U_G(t, t_m, \sigma)$  — функция Гаусса;

$\sigma$  — параметр, характеризующий ширину импульса;

$t_m$  — момент времени, при котором функция достигает максимального значения.

Параметры аппроксимирующей функции  $k_a$ ,  $t_m$ ,  $\sigma$  определяются путем вычисления поправок к их начальным значениям методом наименьших квадратов.

Начальные значения  $k_{a0}$ ,  $t_{m0}$ ,  $\sigma_0$  рекомендуется выбирать следующим образом:

– в качестве  $t_{m0}$  принять момент времени, соответствующий максимальному значению  $U(t)$ ;

– значение  $\sigma_0$  рассчитать по формуле  $\sigma_0 \approx 0,42 \cdot \Delta\tau_{0,5}$ , где  $\Delta\tau_{0,5}$  — длительность импульса по уровню 0,5 амплитуды  $U_{\max}$ ;

– значение  $k_{a0}$  рассчитать по формуле  $k_{a0} = U_{\max} \cdot (2\pi)^{1/2}$ .

Поправки  $\delta_{ka0}$ ,  $\delta_{tm0}$ ,  $\delta_{\sigma_0}$  для уточнения начальных значений параметров функции  $k_{a0}$ ,  $t_{m0}$ ,  $\sigma_0$  определяются путем решения системы уравнений, аналогичной системе (2).

Для расчета коэффициентов  $a_{11}$ ,  $a_{12}$ , ...,  $a_{33}$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  используются экспериментальные данные  $U(t_i)$ , значения функции  $U_i = U_G(t_i, t_{m0}, \sigma_0)$ , вычисленные в точках  $t_i$  ( $i = 1 \dots N$ ,  $N$  — количество отсчетов) с использованием приближенных коэффициентов, а также значения частных производных этой функции в указанных точках, вычисленные по формулам:

$$A_i = \left. \frac{\partial U}{\partial t_m} \right|_{t=t_i; t_m=t_{m0}; \sigma=\sigma_0} = \frac{t_i - t_{m0}}{\sigma_0^3 \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{t_i - t_{m0}}{\sigma_0} \right)^2};$$

$$B_i = \left. \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right|_{t=t_i; t_m=t_{m0}; \sigma=\sigma_0} = \left( \frac{(t_i - t_{m0})^2}{\sigma_0^3} - \frac{1}{\sigma_0} \right) \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{t_i - t_{m0}}{\sigma_0} \right)^2}.$$

Уточненные значения параметров функции  $k_{a1}$ ,  $t_{m1}$ ,  $\sigma_1$  определяются по формулам:

$$k_{a1} = k_{a0} + \delta k_{a0}; \quad t_{m1} = t_{m0} + \delta t_{m0}; \quad \sigma_1 = \sigma_0 + \delta \sigma_0.$$

Далее в качестве приближенных значений коэффициентов аппроксимирующей функции принимаются  $k_{a1}$ ,  $t_{m1}$ ,  $\sigma_1$  и цикл вычислений повторяется, пока значения поправок не станут меньше заранее выбранного малого значения.

Применение этого итерационного метода для аппроксимации формы оптического импульса при определении разности задержек распространения по оптическому волокну гауссовских импульсов лазерного излучения подробно изложено в работе [16].

Определив для каждого из зарегистрированных импульсов параметры аппроксимирующей функции — координаты максимума (пикового значения импульса) по оси времени, вычисляется значение интервала времени ( $T_{ref}$  или  $T_{meas}$ ) между импульсами как разность их координат максимума. Перечисленные операции по определению интервалов времени между импульсами повторяются многократно, затем вычисляются усредненные значения интервалов времени, которые используются для определения задержки, вносимой оптическим элементом, по формуле (1).

Границы случайной погрешности определения предложенным методом задержки распространения сигнала

в оптическом элементе  $\sigma_{oel}$ , выраженной в виде СКО, оценен соотношением:

$$\sigma_{oel} = \sqrt{\sigma_{ref}^2 + \sigma_{meas}^2},$$

где  $\sigma_{ref}$  — СКО определения интервала времени между  $T_{ref}$ ;  $\sigma_{meas}$  — СКО определения интервала времени между  $T_{meas}$ , которое используем для характеристики точности проводимых измерений.

Неисключенная систематическая погрешность (НСП) зависит от характеристик используемых ЦЗО и длительности измеряемых интервалов между импульсами. Для современных ЦЗО в рассматриваемых условиях (измерения в диапазоне до сотен наносекунд) НСП оказывается существенно меньше случайной погрешности.

### Экспериментальная апробация метода

Экспериментальная апробация изложенного метода проведена на созданной установке при использовании лазерных модулей с гауссовской и с лоренцевской формой импульса.

В результате математической обработки зарегистрированных данных для них вычислены параметры аппроксимирующих функций и определены значения задержек в исследуемых оптических элементах. Пример графика аппроксимирующей функции Гаусса приведен на рис. 3.

По результатам экспериментов установлено, что при использовании предложенного метода случайная погрешность измерений интервалов времени между импульсами примерно одинаковой амплитуды, выраженная в виде СКО, уменьшается на 15–20% по сравнению с базовым импульсным методом. В случаях, когда амплитуда опорного и измерительного импульса различается в 2–4 раза (например, при измерениях задержек в устройствах ослабления

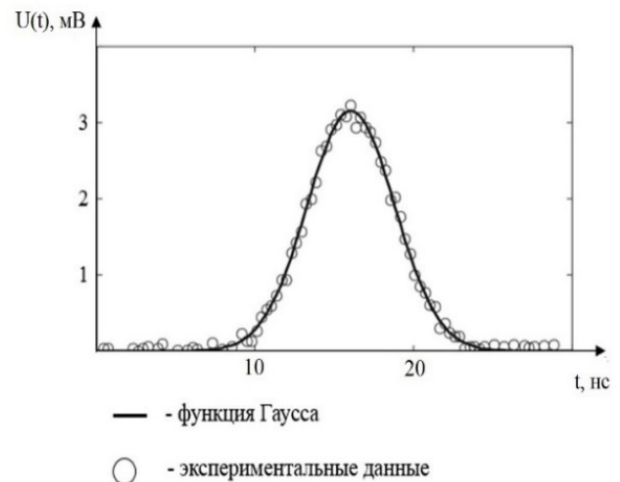


Рис. 3. График аппроксимирующей функции Гаусса





сигнала) за счет применения предложенного метода можно достичь уменьшения СКО результатов измерений интервалов времени в 1,5–2 раза. Из полученных результатов следует, что применение предложенного метода позволяет уменьшить случайную погрешность измерений задержки распространения сигнала в оптических элементах и световодах на 15–20%. Результаты экспериментальной апробации подтвердили возможность использования предложенного метода для повышения точности измерений задержек распространения сигнала в световодах и в оптических элементах с большим вносимым ослаблением сигнала.

### Заключение

Экспериментальная апробация модифицированного импульсного метода с использованием аппроксимации, проведенная на измерительной установке, показала, что погрешность измерения задержек распространения сигналов снизилась на 15–20% по сравнению с импульсным методом. Результаты экспериментальных исследований подтвердили возможность высокоточных измерений задержек распространения сигнала в оптических элементах с помощью представленной установки.

### Литература

1. Колмогоров О.В., Щипунов А.Н., Прохоров Д.В., Донченко С.С., Буев С.Г., Малимон А.Н., Балаев Р.И., Федорова Д.М. Система передачи эталонных сигналов частоты и времени измерительным средствам наземного комплекса ГЛОНАСС по оптическому кабелю // Измерительная техника. 2017. № 9. С. 29–32.
2. Kolmogorov O. V., Donchenko S. S., Prokhorov D. V. System of comparison of time scales of distant objects via optical fiber // Proc. of the 2017 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFC), Besançon, France, 9–13 July 2017. IEEE, 2017. Pp. 417–418.
3. Щербаков В.В., Солодков А.Ф., Шелков Н.В., Озеров Ю.В. Экспериментальное исследование отечественного оптического волокна в составе волоконно-оптической линии задержки // Фотон-Экспресс. 2016. № 1 (129). С. 39–40.
4. Колмогоров О.В., Щипунов А.Н., Прохоров Д.В., Донченко С.С. Оптический рефлектометр для прецизионных измерений — схема и результаты теоретических и экспериментальных исследований. Прикладная фотоника. 2018. Т. 5. № 1–2. 92–101.
5. Голов Н.А., Савченко В.П., Усачев В.А., Соколов В.А., Ягольников С.В. Особенности и принципиальные преимущества элементной базы радиофотоники при создании сверхширокополосных РЛС на базе ФАР и АФАР // Антенны. 2016. №3 (223). С. 19–25.
6. Щербаков В.В. О практике применения радиофотонных устройств в радиолокации: Доклад на II всероссийской научно-технической конференции «Перспективы развития РЛС дальнего обнаружения и интегрированных систем и комплексов информационного обеспечения ВКО», Москва 18 июня 2014. URL: <http://centervospi.ru/articles/o-praktike-primeneniya-radiofotonnyh-ustroystv-v-radiolokacii/> (дата обращения 16.07.2019).
7. Boudesocque D., Berland F., Hallak Elwan H., Fromenteze T., Decroze C., Di Bin P., Aupetit-Berthelemot C. Experimentation based development of a simulation platform of a microwave photonics MIMO imaging system // Proceeding of 45<sup>th</sup> European Conference on Optical Communications (Dublin, 22–26 September 2019). ECOC, 2019. URL: <https://doi.org/10.1049/cp.2019.1082> (дата обращения 16.07.2019).
8. Мятинцев М.Б. К реализации технологий радиофотоники в АФАР радиолокационных комплексов // Вестник СибГУТИ. 2015. № 2. С. 178–190.
9. Garcia S., Guillem R., Madrigal J., Barrera D., Gasulla I. Few-mode fibre delay lines with inscribed long period gratings for radiofrequency signal processing // Proceeding of 45th European Conference on Optical Communications (Dublin, 22 - 26 September 2019). ECOC, 2019. URL: <https://doi.org/10.1049/cp.2019.0781> (дата обращения 16.07.2019).
10. Bogoni A., Ghelfi P., Scotti F., Porzi C., Serafino G., Falconi F., Lembo L., Malacarne A. Microwave photonics technologies for 5G and industry 4.0 // Proceeding of 45th European Conference on Optical Communications (Dublin, 22 - 26 September 2019). ECOC, 2019. URL: <https://doi.org/10.1049/cp.2019.0840> (дата обращения 16.07.2019).
11. Lau K. Y., Lutes G. F. Planetary Radar Imaging and RF-Over-Fiber // Optics & Photonics News. 2014. No. 25(6). Pp. 44–51.
12. Kanno A., Yamamoto N. Radio over fiber network technology for millimeter-wave distributed radar systems // Proc. of the Broadband Access Communication Technologies XII, 105590Q (San Francisco, 29 January 2018). SPIE, 2018. Vol. 10559. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2287731> (дата обращения 16.07.2019).
13. Иванов А.Б. Волоконная оптика. Компоненты, системы передачи, измерения. М.: Syrus Systems, 1999. 672 с.
14. Гауэр Дж. Оптические системы связи: пер. с англ. М.: Радио и связь, 1989. 504 с.
15. Веснин В.Л. Метод Гауссовской аппроксимации пика спектра отражения волоконно-оптического Брэгговского датчика // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2003. Т. 5. № 1. С. 156–164.
16. Колмогоров О.В., Щипунов А.Н., Прохоров Д.В., Донченко С.С., Буев С.Г. Метод определения разности задержек распространения по оптическому волокну импульсов лазерного излучения систем сравнений и синхронизации шкал времени // Фотоника. 2018. Т. 12. № 7 (75). С. 696–703.

## INSTALLATION FOR MEASURING SIGNAL PROPAGATION DELAYS IN OPTICAL ELEMENTS

**OLEG V. KOLMOGOROV**

Mendeleevo, Russia, kolmogorov@vniiftri.ru

**ANNA V. DEIKUN**

Mendeleevo, Russia, anna@vniiftri.ru

**EKATERINA V. CHEMESOVA**

Moscow, Russia, dobro\_k@list.ru

**KEYWORDS:** measurement installation; optical pulse; optical element; approximation; error; signal propagation delay.

### ABSTRACT

The results of the development of an installation for measuring signal propagation delays in optical elements and optical fibers are presented. Measuring the delays of signal propagation in optical elements and optical fibers required for the development of various instruments, in particular, the development of fiber-optic systems, the synchronization time scales for complexes of metrological support of the global navigation satellite system GLONASS and measuring means of ground-based GLONASS, the development of metrological maintenance of fiber-optic communication systems, the development radiophonic systems (e.g., phased arrays with fiber-optical channels, measuring systems with remote antennas). It is shown that the installation allows to implement phase and pulse methods for measuring signal propagation delays introduced by optical elements, as well as a modified pulse method designed to determine the delays in optical elements with a large signal attenuation, when the accuracy of measurements by other methods is reduced due to the increasing influence of noise measuring equipment. The developed method is based on registration of the pulse shape with the help of analog-to-digital Converter, the approximation was a data taking into account information about the original form of pulses to reduce random error caused by the influence of noise, and subsequent determination of temporal characteristics of pulses using parameters approximating functions. The application of the developed method for various forms of laser pulses is considered, the scheme of the installation implementing these methods is presented, and the results of experimental studies of the installation are presented. It is shown that the modified pulse method allows to reduce the measurement error of signal propagation delays in optical fibers and optical elements by 15–20% or more, depending on the introduced attenuation, and the installation for measuring signal propagation delays can be used to control the characteristics of optical fibers and optical elements of various fiber-optic systems.

### REFERENCES

1. Kolmogorov O.V., Shchipunov A.N., Prokhorov D.V., Donchenko S.S., Buev S.G., Malimon A.N., Balaev R.I., Fedorova D.M. System for Transmitting Reference Frequency and Time Signals to Measurement Resources of the GLONASS Ground Complex by Optical Cable. *Measurement Techniques*. 2017. Vol. 60. No. 9. Pp. 901–905.
2. Kolmogorov O.V., Donchenko S.S., Prokhorov D.V. System of comparison of time scales of distant objects via optical fiber. *Proc. of the 2017 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFC)*, Besançon, France, 9–13 July 2017. IEEE, 2017. Pp. 417–418.
3. Shcherbakov V.V., Solodkov A.F., Shelkov N.V., Ozerov Yu.V. Eksperimental'noe issledovanie otechestvennogo opticheskogo volokna v sostave volokonno-opticheskoy linii zaderzhki [Experimental study of domestic optical fiber as part of a fiber-optic delay line]. *Foton-Ekspress* [Photon-Express]. 2016 No. 1 (129). Pp. 39–40. (In Rus)
4. Kolmogorov O.V., Shchipunov A.N., Prokhorov D.V., Donchenko S.S. Optical time domain reflectometer for precision measurements – scheme and results of theoretical and experimental research. *Applied Photonics*. 2018. Vol. 5. No. 1–2. Pp. 92–101. (In Rus)
5. Golov N.A., Savchenko V.P., Usachev V.A., Sokolov I.A., Yagolnikov S.V. Features and fundamental benefits of the microwave photonic components to create ultra-wideband radar based on phased array antenna and active phased array antenna. *Antennas*. 2016. No. 3 (223). Pp. 19–25. (In Rus)
6. O praktike primeneniya radiofotonnykh ustroystv v radiolokatsii [On the practice of using radioisotope devices in radar]. Doklad na II vsrossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Perspektivy razvitiya RLS dal'nego obnaruzheniya i integrirovannykh sistem i kompleksov informatsionnogo obespecheniya VKO" [Report at the II all-Russian scientific and technical conference "Prospects of development of long-range radar detection and integrated systems and complexes of information support of EKR", Moscow, 18 June 2014]. URL:



<http://centervospi.ru/articles/o-praktike-primeneniya-radiofotonnyh-ustrojstv-v-radiolokacii/> (date of access 16.07.2019). (In Rus)

7. Boudesocque D., Berland F., Hallak Elwan H., Fromenteze T., Decroze C., Di Bin P., Aupetit-Berthelemot C. Experimentation based development of a simulation platform of a microwave photonics MIMO imaging system. *Proceeding of 45<sup>th</sup> European Conference on Optical Communications* (Dublin, 22-26 September 2019). ECOC, 2019. URL: <https://doi.org/10.1049/cp.2019.1082> (дата обращения 16.07.2019).
8. Mityashev M.B. On the implementation of radio-photon technologies in APAA of radar systems. *Vestnik SibSUTI*. 2015. No. 2. Pp. 178-190. (In Rus)
9. García S., Guillem R., Madrigal J., Barrera D., Gasulla I.. Few-mode fibre delay lines with inscribed long period gratings for radio-frequency signal processing. *Proceeding of 45<sup>th</sup> European Conference on Optical Communications* (Dublin, 22-26 September 2019). ECOC, 2019. URL: <https://doi.org/10.1049/cp.2019.0781> (дата обращения 16.07.2019).
10. Bogoni A., Ghelfi P., Scotti F., Porzi C., Serafino G., Falconi F., Lembo L., Malacarne A. Microwave photonics technologies for 5G and industry 4.0. *Proceeding of 45<sup>th</sup> European Conference on Optical Communications* (Dublin, 22-26 September 2019). ECOC, 2019. URL: <https://doi.org/10.1049/cp.2019.0840> (дата обращения 16.07.2019).
11. Lau K.Y., Lutes G.F. Planetary Radar Imaging and RF-Over-Fiber. *Optics & Photonics News*. 2014. No. 25(6). Pp. 44-51. URL: <https://doi.org/10.1049/cp.2019.0840> (дата обращения 16.07.2019).
12. Kanno A. Yamamoto N. Radio over fiber network technology for millimeter-wave distributed radar systems. *Proc. of the Broadband Access Communication Technologies XII*, 105590Q (San Francisco, 29 January 2018). SPIE, 2018. Vol. 10559. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2287731> (date of access 16.07.2019).
13. Ivanov A.B. *Volokonnaya optika. Komponenty, sistemy peredachi, izmereniya* [Fiber optics. Components, transmission systems, measurements]. Moscow: Syrus Systems, 1999. 672 p. (In Rus)
14. Gower Jn. *Optical communication systems*. Prentice Hall International, 1984. 577 p.
15. Vesnin V.L. Method of gauss approximation for optical fiber Bragg grating sensor reflection spectrum peak. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2003. Vol. 5. No. 1. Pp. 156-164. (In Rus)
16. Kolmogorov O.V., Shchipunov A.N., Prokhorov D.V., Donchenko S.S., Buyev S.G. Method for determining the difference of delays of laser radiation pulse propagation through optical fiber in the time scale comparison and synchronization systems. *Photonics*. 2018. Vol. 12. No. 7 (75). Pp. 696-703. (In Rus)

**INFORMATION ABOUT AUTHORS:**

Kolmogorov O.V., PhD, Head of laboratory of the Russian metrological institute of technical physics and radio engineering;  
Deikun A.V., Engineer-surveyor of Federal state unitary enterprise of the Russian metrological institute of technical physics and radio engineering;  
Chemesova E.V., Student of Federal state budgetary institution of higher education of the MIREA – Russian technological university.

**For citation:** Kolmogorov O.V., Deikun A.V., Chemesova E.V. Installation for measuring signal propagation delays in optical elements. *H&ES Research*. 2020. Vol. 12. No. 4. Pp. 36-43. doi: 10.36724/2409-5419-2020-12-4-36-43 (In Rus)





doi: 10.36724/2409-5419-2020-12-4-44-55

# ФОРМАЛИЗАЦИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

**ПУГАЧЕВ****Алексей Юрьевич<sup>1</sup>****ТАТАРОВ****Максим Олегович<sup>2</sup>****МУРАШОВ****Анатолий Александрович<sup>3</sup>****АННОТАЦИЯ**

Современные комплексы военной техники, находящиеся на вооружении Воздушно-космических сил России, содержат в своем составе значительное количество радиоэлектронной аппаратуры. Наиболее критичной операцией при восстановлении их работоспособности в процессе эксплуатации является техническое диагностирование, выполнение которого направлено на определение мест и причин неисправностей. Информационная поддержка диагностирования в настоящее время организована на основе бумажного комплекта документации, использование которого характеризуется значительными временными задержками. Показано, что известные автоматизированные системы информационной поддержки диагностирования ориентированы на предоставление информации об эталонном состоянии аппаратуры и не позволяют автоматизированно определять непосредственно причину неисправности по диагностическим признакам. Предсказано, что построение диагностической модели, отражающей взаимосвязь признаков и причин неисправностей, позволит повысить уровень автоматизации информационной поддержки за счет создания человеко-машинного интерфейса, обеспечивающего диалог системы с обслуживающим персоналом в конструкциях естественного языка. Целью работы является создание способа представления неисправностей в виде диагностической фреймовой модели, выступающей в качестве информационного ресурса информационной диалоговой системы, которая позволяет значительно сократить время, требуемое для определения причин неисправностей радиоэлектронной аппаратуры. Новизна предлагаемого подхода к концептуальной формализации неисправностей радиоэлектронной аппаратуры состоит в том, что он позволяет напрямую оперировать терминами и понятиями предметной области технического диагностирования в конструкциях естественного языка без необходимости их преобразования в математические нотации, представляющие признаки неисправностей в информационных системах традиционной структуры. Показано, что представление неисправностей на основе предлагаемого подхода может выступать в качестве основного информационного ресурса диагностической диалоговой системы, функционирующей по принципу «вопрос-ответ» на естественно-подобном языке. Построение информационного интерфейса, обеспечивающего связь диагностической модели с обслуживающим персоналом посредством запросов и ответов на естественно-подобном языке, обеспечивает значительное сокращение времени диагностирования, что позволяет снизить общее время восстановления технических комплексов и систем.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** техническое диагностирование; диагностический признак неисправности; радиоэлектронная аппаратура; концептуальная формализация; явные диагностические модели; фреймы.

**Сведения об авторах:**

<sup>1</sup>к.т.н., заместитель начальника научно-исследовательского отдела Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны, г. Ярославль, Россия, yavvu\_oni@mil.ru

<sup>2</sup>к.т.н., доцент, начальник научно-исследовательского отдела Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны, г. Ярославль, Россия, yavvu\_oni@mil.ru

<sup>3</sup>д.т.н., доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны, г. Ярославль, Россия, yavvu\_oni@mil.ru

**Для цитирования:** Пугачев А.Ю., Татаров М.О., Мурашов А.А. Формализация неисправностей радиоэлектронной аппаратуры при проектировании диагностических систем сложных технических комплексов // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2020. Т. 12. № 4. С. 44–55. doi: 10.36724/2409-5419-2020-12-4-44-55

## Введение

Одним из путей повышения эксплуатационных показателей радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) сложных технических комплексов является сокращение времени восстановления за счет использования средств автоматизации (СА). Наиболее трудоемкой операцией при восстановлении РЭА, слабо поддающимся автоматизации, является техническое диагностирование. Это объясняется необходимостью выполнения значительного числа трудно автоматизируемых операций, требующих непосредственного участия обслуживающего персонала (ОП), таких, как формирование диагностических признаков неисправностей, анализ расхождения между эталонными и измеренными значениями диагностических параметров и т. д.

В настоящее время существует ряд методов и методик, направленных на решение задач автоматизации процесса диагностирования РЭА, использующие в своей основе модельное представление аппаратуры [1–3]. Использование моделей РЭА в средствах автоматизации процесса диагностирования позволяет в упрощенном виде отражать определенные аспекты представления аппаратуры [4], что предоставляет возможность в системах информационной поддержки (СИП) более эффективно организовать процедуру технического диагностирования с участием ОП. Анализ таких диагностических моделей (ДМ) показывает, что большинство из них представляются в математических понятиях и терминах теории графов, матриц, множеств и т. п., а не в понятиях и терминах предметной области [3, 4]. Это приводит к тому, что обслуживающему персоналу необходимо иметь знания и опыт взаимодействия с ДМ и запросными средствами для извлечения диагностической информации (прямая интерпретация моделей), а также для формирования условий, определяющих в запросах ОП требования к необходимой диагностической информации (обратная интерпретация моделей). Вследствие этого при выполнении операций диагностирования имеют место определенные временные потери, что негативно отражается на значении эксплуатационных показателей РЭА.

Примером подобного взаимодействия ОП с системой информационной поддержки технического диагностирования может выступать операция локализации отказов в процессе технической эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры зенитных ракетных комплексов (ЗРК). Алгоритм действий по поиску места и причины неисправности РЭА состоит, как правило, в последовательном получении информации о реальных значениях диагностических параметров путем наблюдений или измерений, в оценке расхождений между реальными и эталонными значениями, а также в принятии решения о причине неисправности по совокупности выявленных расхождений. В случае с аппаратурой зенитных ракетных комплексов основным официальным источником диагностической информации об эталонных

характеристиках выступает комплект эксплуатационной документации (ЭД), входящий в комплект поставки этих комплексов. Особенность построения документации на ЗРК состоит в том, что аппаратура описывается довольно подробно: рассматриваются особенности конструктивной реализации, выполняемые функциональные задачи, номинальные значения большого количества параметров. В документации часто приводятся технологические требования и рекомендации по проведению регулировок, измерений, монтажа/демонтажа и пр.

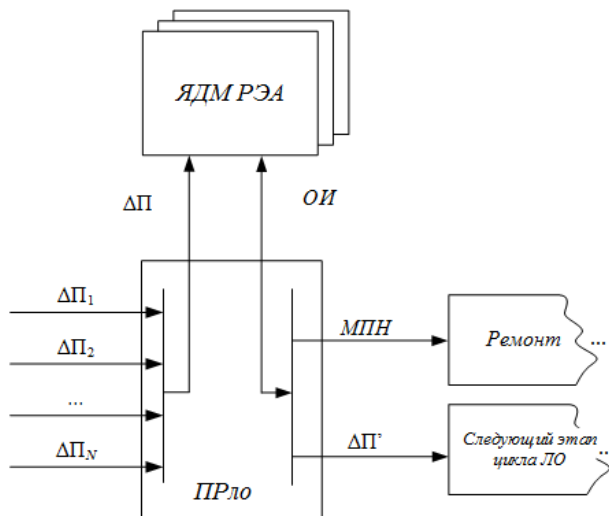
Приведенный выше пример иллюстрирует то, что высокая информативность источников сведений об объекте диагностирования положительно влияет на востребованность СИП в процессе технического диагностирования, а также способствует сокращению времени его выполнения. Однако, несмотря на очевидные достоинства от использования СА при техническом диагностировании, общий уровень автоматизации процесса диагностирования в целом остается невысоким, так как основную роль в выполнении отдельных операций, а также в принятии решений на основе получаемой диагностической информации (ДИ) выполняет ОП.

Высокие потенциальные возможности по автоматизации процесса диагностирования РЭА, обеспечиваются при использовании особого вида диагностических моделей, которые в литературе [3] называются *явными* диагностическими моделями (ЯДМ). Особенность таких моделей состоит в наличии в них явного описания свойств и признаков аппаратуры, совокупность которых позволяет идентифицировать ее состояние, а также выработать решение о вероятном месте и причине отказа РЭА. В отличие от неявных, явные диагностические модели обеспечивают прямое соответствие между совокупностью признаков неисправностей и их причинами.

На рис. 1 иллюстрируется использование ЯДМ при определении вероятных мест и причин неисправностей РЭА. Здесь  $\Delta P_1, \Delta P_2, \Delta P_N$  — множество расхождений между реальным и эталонным значениями параметров, «подозреваемых» в нарушении. Эти параметры в совокупности составляют множество  $\Delta P$  и выступают в качестве «образа» неисправности — множества изменений в аппаратуре, характеризующих нарушение ее технического состояния [1–4].

## Постановка задачи

Рассматривая взаимодействие обслуживающего персонала с информационным источником ЯДМ РЭА как некий диалог в ходе принятия решения  $PP_{\text{ло}}$  о локализации отказа, следует отметить, что в качестве запроса ОП, или условия для поиска информации, рассматривается множество  $\Delta P$  диагностических признаков неисправностей, в то время, как ответом на такой запрос следует расценивать ответную информацию ОИ в контексте неисправности — прямое указание на вероятное МПН место и причину неисправности либо указание на то, что требуется указать



**Рис. 1.** Схема принятия решения о вероятном месте и причинах неисправностей при использовании диагностических моделей в явной форме

недостающие диагностические признаки  $\Delta П'$  и перейти к следующему циклу ЛО локализации отказа.

Организованное таким образом взаимодействие с информационным источником ЯДМ РЭА обеспечивает некоторое сокращение времени, затрачиваемого на анализ имеющихся признаков неисправностей непосредственно при принятии решения о вероятном месте и причине неисправности [3, 4, 6]. При этом эффективность использования явных диагностических моделей в средствах автоматизации в значительной степени определяется видом формализованного представления ДМ и способами работы с ними [2, 4, 5]. Применение бумажных документов, как в вышерассмотренном примере, создает определенные временные задержки, связанные с навигацией в информационном источнике и невозможностью контекстного поиска. Напротив, использование СИП, построенных на основе систем управления базами данных, как правило, требует наличия специфических компетенций в сфере информационных технологий, что не всегда оправдано при решении задач непосредственно технического диагностирования.

С этой точки зрения большой интерес представляют концептуальные диагностические модели, которые характеризуются использованием терминов, понятий и конструкций естественного языка [4, 6]. Использование так называемого *концептуального формализованного представления* объекта диагностирования позволяет совместить математический, «машинный» и структурно-логический, «человеческий» язык описания объектов, явлений или процессов. Такой подход зарекомендовал себя с положительной стороны при решении задач формирования схемных фрагментов, агрегированных текстовых

документов и перечисления текстовых данных по условиям запросов, выполненных в конструкциях естественного языка [4–8]. Тем не менее, представленные в работах [6–8] способы формирования диагностических моделей не учитывают возможность сопоставления диагностических признаков неисправностей и соответствующих причин, что обуславливает необходимость непосредственного, *явного* представления неисправностей, выполненного на основе математического аппарата представления информации о них в виде формальной системы.

Анализ зарубежных работ, посвященные инженерии знаний в технической диагностике, указывает на глубокую проработку методик выявления и анализа специфических характеристик, параметров и признаков, указывающих на наличие проявлений неисправностей в технических системах [9, 11]. Одновременно с этим, в источниках [6–10] отсутствуют работы, направленные на разработку информационных интерфейсов, ориентированных на выдачу информации о вероятных причинах неисправностей по диагностическим признакам, приведенным в конструкциях естественного языка.

Учитывая отмеченные факторы, задача разработки формализованной концептуальной диагностической модели на основе формальной системы представления знаний, которая позволяет выступать информационной основой для естественно-языковых интерфейсов, является актуальной.

### Выбор формальной системы представления неисправностей

Следует отметить, что в науке известны работы, в которых изложены результаты исследований по выбору формальной системы представления радиоэлектронной аппаратуры и ее неисправностей в виде семантических сетей [11, 12]. Такой подход к формальному представлению РЭА позволяет отразить математико-лингвистическую природу описания неисправностей, т.е. на требуемом уровне обеспечить связность языковых триплетных конструкций «*объект-предикат-субъект*» и семантических шаблонов вида «*вершина-дуга-вершина*» [1, 5]. Несмотря на это, математический аппарат семантических сетей имеет ряд ограничений с точки зрения установления взаимосвязи между диагностическими признаками неисправностей и их причинами. Кроме того, для описания неисправностей, вызванных более сложными видами отказов — зависимыми, перемежающимися, постепенными — следует использовать более гибкие формальные системы, позволяющие отразить изменения в техническом состоянии объекта диагностирования во времени — как динамический процесс.

Вопросы представления и *накопления* знаний в формальных информационных системах решались для различных предметных областей: экономики, менеджмен-



та, медицины, технических наук. Так, в работах [13–15] представлен механизм аккумуляции знаний о бизнес-процессах, в работах [16, 17] изложены подходы к созданию экспертных систем для поддержки принятия решений в медицинской диагностике и машинном переводе. Общей характерной чертой таких подходов выступает использование фреймовой модели представления знаний [18]. Совокупность знаний, представленная в виде модели на основе фреймов, обеспечивает возможность, помимо прочего, учитывать контекст ситуации, в которой находится объект диагностирования, а значит, — смоделировать процесс неблагоприятного воздействия на аппаратуру, приведший к неисправности.

Кроме того, следует отметить, что в работе [13] приведен механизм перехода от фреймовой модели объектов, сущностей и процессов к их объектно-ориентированному представлению, что позволяет перейти от строго научной к информационно-технологической форме описания моделей, широко используемых при проектировании и разработке современных автоматизированных систем на языках программирования высокого уровня [5, 13, 18].

Выбор подходящей формальной системы представления знаний целесообразно выполнить с учетом трех основных аспектов:

1. Диагностический аспект: наличие соответствия между множеством  $P_i^{(*)}$  неноминальных свойств, описывающих неисправность РЭА, и множеством  $S^{(*)}$  неисправных состояний РЭА;

2. Концептуальный аспект: представление всякого свойства  $p_{ij}$ , описывающего РЭА (исправную или неисправную), набором терминов  $\hat{A}$ , понятий  $\hat{E}$  и отношений  $\hat{R}$  предметной области;

3. Формальный аспект: представление связей между предметными терминами  $\hat{A}$  понятиями  $\hat{E}$  и отношениями  $\hat{R}$ , характеризующих неисправности РЭА, в виде математических выражений.

С учетом этого, процесс представления неисправностей в виде ЯДМ предполагает использование набора формальных абстракций, содержащих описание объектов детерминированной структуры с помощью набора атрибутов, а также различных типов отношений между такими абстракциями. В качестве примера объекта с такой структурой предлагается рассмотреть фрагмент матрицы состояний конкретного блока зенитного ракетного комплекса — блока ФР361Е2, входящего в состав аппаратуры подготовки и пуска ракет (АППР) 83Ф6Е2. В эксплуатационной документации данная матрица состояний представляется в табличном виде, как отражено в табл. 1.

Следует отметить, что в этой таблице находят отражение каждый из рассмотренных выше аспектов, однако основным из них является диагностический, как наиболее востребованный обслуживающим персоналом в процессе

диагностирования. Этот аспект выражается в сопоставлении множества  $S$  дискретных состояний аппаратуры множеству  $\Theta$  элементарных проверок на контрольных точках. Концептуальный аспект построения такой диагностической модели представлен наличием объектных понятий и терминов  $\hat{E}$ , а также связей  $\hat{R}$  между ними. Формальный аспект в рассматриваемом примере проявляется слабо и используется исключительно для структуризации диагностической информации в конкретных ячейках таблицы. Соответствие между текущим состоянием  $s_i$  РЭА и проверками номиналов некоторых свойств  $P_i$  аппаратуры следует представить в следующем виде:

$$s_i \leftrightarrow \theta(P_i), \quad (1)$$

где  $\theta(P_i) = \{\theta(p_{i1}), \theta(p_{i2}), \dots, \theta(p_{iN})\}$  — множество проверок, необходимых для различения текущего состояния РЭА.

В свою очередь, всякое свойство  $p_{ij} \in P_i$  может быть представлено совокупностью бинарных отношений вида  $r_a(e_m, e_n)$ , каждое из которых характеризует связь между двумя элементами  $e_p, e_j$  в описании аппаратуры:

$$p_{ij} = r_a(e_m, e_n) \cup r_b(e_k, e_p) \cup \dots \cup r_z(e_x, e_y). \quad (2)$$

Следует отметить, что описание неисправности  $x_i$  помимо признаков, представленных нарушением свойств  $P_i^*$ , содержит причины  $\omega_p$ , представленные наличием конструктивного или эксплуатационного дефекта  $d_p$ , а также действия  $z_p$ , направленные на восстановление исправного состояния  $s_0$  из неисправного состояния  $s_i$ . Полное формальное описание такой неисправности может быть записано в следующем виде:

$$x_i = \langle s_i, P_i, \theta_i, \omega_i(d_i), z_i(s_i, s_0) \rangle. \quad (3)$$

Раскрывая концептуальный аспект формального описания неисправности в ЯДМ с учетом использования в каждом элементе описания неисправности  $x_i$  предметных понятий, терминов и конструкций, кортеж (3) можно записать в следующем виде:

$$x_i = \langle s_i, P_i(\hat{A}, \hat{R}), \theta_i(\hat{A}, \hat{R}), \omega_i(d_i, \hat{A}, \hat{R}), z_i(s_i, s_0(\hat{A})) \rangle, \quad (4)$$

где  $P_i(\hat{A}, \hat{R}) = \{p_{i1}(\hat{A}, \hat{R}), p_{i2}(\hat{A}, \hat{R}), \dots, p_{iN}(\hat{A}, \hat{R})\}$ ,

$$\theta_i(\hat{A}, \hat{R}) = \{\theta_{i1}(\hat{A}, \hat{R}), \theta_{i2}(\hat{A}, \hat{R}), \dots, \theta_{iN}(\hat{A}, \hat{R})\}.$$

Таблица 1

Представление фрагмента матрицы состояний в виде фрагмента таблицы неисправностей

| ДПар<br>Состояния бл.ФР361Е2                                     | $\theta_1$<br>Напряжение питания разъема Ш2-14 | $\theta_2$<br>Свечение индикатора «Неиспр. пит» | $\theta_3$<br>Состояние предохранителя Пр1 | $\theta_4$<br>Ток нагрузки на разъеме Ш3-18 | $D(\theta_i)$<br>Вероятное место и причина отказа |
|--|--|---|--|---|---|
| $s_0$ : Блок ФР361Е2 исправен                                    | $P_1^{(0)}$<br>5В±10%                          | $P_2^{(0)}$<br>Не светится                      | $P_3^{(0)}$<br>В порядке                   | $P_4^{(0)}$<br>20..30 мА                    | -   |
| $s_1$ : Внутреннее нарушение электропитания БПС-1                | $P_1^{(0)}$<br>5В±10%                          | $P_2^{(0)}$<br>Не светится                      | $P_3^{(0)}$<br>В порядке                   | $P_4^{(1)}$<br>0 А                          | БПС-1 (ОА1)                                       |
| $s_2$ : Внутреннее нарушение электропитания ДЦ200-05             | $P_1^{(2)}$<br>0 В                             | $P_2^{(0)}$<br>Не светится                      | $P_3^{(1)}$<br>Перегорел                   | $P_4^{(1)}$<br>0 А                          | ДЦ200-05 (01)                                     |
| $s_3$ : Внутреннее нарушение стабилизации напряжения БПС-3 (ОА2) | $P_1^{(3)}$<br>5,5..7 В                        | $P_2^{(0)}$<br>Не светится                      | $P_3^{(0)}$<br>В порядке                   | $P_4^{(0)}$<br>20..30 мА                    | БПС-3 (ОА2)                                       |
| $s_4$ : Короткое замыкание в нагрузке блока ФР361Е2              | $P_1^{(4)}$<br>5В±10%                          | $P_2^{(1)}$<br>Светится красным светом          | $P_3^{(0)}$<br>В порядке                   | $P_4^{(2)}$<br>>0,5 А                       | электрический контакт в нагрузке блока ФР361Е2    |
| ...  | ...  | ...   | ...  | ...   | ...   |

Такое формальное представление неисправностей осуществляется в математических терминах и нотациях теории множеств и отношений и не допускает формализации использования предметных терминов и понятий.

#### Особенности реализации явной диагностической модели неисправной радиоэлектронной аппаратуры в виде фреймов

Для перехода к концептуальному формализованному представлению неисправностей, с учетом структурных особенностей представления (4) целесообразно использовать фреймовые модели. Для этого с каждой неисправностью  $x_i$  следует ассоциировать некоторый образ, который представляется в виде фрейма  $\Phi_i$ , формально описывающий ассоциированную с ним сущность в виде последовательности слотов разного типа [18].

В соответствии с существующим определением фреймов целесообразно использовать формальное представление фрейма  $\Phi$  в виде кортежа слотов:

$$\Phi = \langle \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n \rangle, \quad (5)$$

При этом каждый слот  $\sigma_i (i = \overline{1, n})$  в общем виде имеет некоторую структуру, определяемую следующим образом:

$$\sigma_i = (V_i, \delta_i), \quad (6)$$

где  $V_i$  — множество значений слота  $\sigma_i$ ,  
 $\delta_i$  — демон слота  $\sigma_i$  [18].

Детерминированная структура описания неисправностей РЭА в виде (4) обеспечивает единые правила формирования общей фреймовой модели для описания неисправностей (ЯДФМ) из множества отдельных фреймов. Построение такой модели требует учета различных аспектов представления неисправностей в предметных понятиях, в связи с чем предлагается учитывать три аспекта: сущностный, ролевой и сценарный. Сущностный аспект отражает наличие и характеристику структурных элементов (сущностей), которые используются для описания признаков и причин неисправностей. Ролевой аспект отражает функциональность РЭА и нарушение функциональности. Наличие в ЯДФМ сценарного аспекта отражает взаимосвязь понятий предметной области (сопоставление признаков неисправности причинам, взаимозависимость электрических сигналов, влияние параметров элементов на функционал аппаратуры), связанных с представлением исправных и неисправных состояний.

В соответствии с этим, ЯДФМ целесообразно формировать на основе фреймов трех видов: фреймов-экземпляров  $\Phi^{(1)}$ , фреймов-ролей  $\Phi^{(2)}$  и фреймов-сценариев  $\Phi^{(3)}$ , определив особенности построения для каждого вида фрейма [5, 7, 18].

В качестве исходных данных для формирования фреймов-экземпляров  $\Phi^{(1)}$  выступает множество понятий  $A$ , формируемое на основе концептуального анализа данных различного типа из эксплуатационной документации (ЭД): электрических схем РЭА, технического описания и инструкции по эксплуатации КСН. Такие документы,





выполненные в текстовом и графическом виде, содержат набор данных, которые ОП может использовать при решении задач диагностирования: название блока, условное буквенно-цифровое обозначение блока, условные графические обозначения, а также наименования входящих в блок структурных элементов (ячеек, плат), элементов индикации и управления, входных, выходных и внутриблочных сигналов, соединительных элементов (жгутов, кабелей, проводов) между элементами схемы, разъемов и контактов и т.п.

С учетом вышеуказанных факторов, фрейм-экземпляр такого структурного элемента, как ячейка РЭА, может быть представлен в табл. 2. Этот фрейм содержит в столбце значений данных как предметные понятия, так и текстовые строки, что позволяет представить некоторую информацию о сущности РЭА в виде метаданных детерминированной структуры.

Таблица 2

Фрейм-экземпляр структурного элемента РЭА (пример)

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| Имя фрейма                    | Ячейка А   |
| Название                      | Ячейка коммутации  |
| Маркировка                    | Я001А  |
| Позиционное обозначение       | У5   |
| Уровень                       | Стандартная ячейка с 2 разъемами   |
| Входящие структурные элементы | Схема коммутации S1, подстроечный резистор R2, устройство сравнение УЗ, Индикатор И4, Индикатор И5, разъем Р6, разъем Р7 |
| Электрические цепи:           | Ц1, Ц2, Ц3, Ц4   |

Для учета структурных элементов, входящих в данный фрейм, предусмотрен слот «Входящие структурные элементы». Типовая ячейка РЭА может включать в себя 2 элемента типа «Индикатор», 2 элемента типа «Разъем», 2 элемента типа «Цифровая схема», 1 элемент типа «Резистор». Каждый из них, в свою очередь, также имеет собственное описание в виде фрейма-экземпляра с соответствующим значением слота «Уровень». Согласно существующей иерархии базовых несущих конструкций (БНК), для этого слота предусматривается 4 уровня разукрупнения:

4 — контейнер,

3 — шкаф,

2 — блок,

1 — ячейка,

0 — радиотехнический элемент или сборка, входящая в ячейку.

При определении ЯДФМ целесообразно ввести фреймы соединительных элементов, конструктивно выполняющие функцию коммутации электрических цепей.

Эти элементы следует разделить на уровни по принципу разукрупнения тех структурных элементов, которые они связывают:

4 — линии связи между шкафами и контейнерами, а также разъемы этих линий связи;

3 — многожильные кабели, связывающие блоки, а также разъемы этих кабелей;

2 — многомодовые линии связи между ячейкой и монтажной платой, а также разъемы этих линий связи;

1 — проводники внутри ячейки (одномодовые);

0 — контакты проводников или разъемов любого уровня разукрупнения.

Необходимость представления соединительных элементов в виде полноценных фреймов структурных элементов обусловлена тем, что причины значительной части неисправностей РЭА связаны с отсутствием качественного контакта между проводниками, обгоранием, окислением контакта, нарушением целостности изоляции проводника, их замыканием и некоторыми другими факторами, которые предусматривают нарушение передачи электрических сигналов или изменение их параметров.

Понятие «параметр» является одним из важных при описании неисправностей, поэтому это понятие также целесообразно представлять, как сущность, в виде фрейма, ассоциированного с тем структурным элементом, на котором он может быть измерен или отмечен. В качестве примера фреймы-экземпляры двух параметров, разных по типу и подтипу, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Фреймы-экземпляры электрического и визуального параметров

| Имя фрейма  | параметр П <sub>1</sub>               | параметр П <sub>2</sub>                                      |
|---|---------------------------------------|--|
| Название  | напряжение контакта К <sub>1</sub>    | свечение индикатора И <sub>2</sub>                           |
| Связанный элемент структуры                           | контакт 1Ш1/18                        | индикатор «Испр.»  |
| Тип параметра   | электрический                         | визуальный   |
| Подтип параметра (характеризующая величина)           | напряжение                            | цвет свечения  |
| Номинальное значение                                  | 5В ±5%                                | зеленый  |
| Необходимая аппаратура для проведения проверки        | вольтметр                             | —  |
| Отклонения от номинала, характеризующие неисправность | 0..1,5В;<br>1,5В..5В-5%;<br>5В+5%..+∞ | красный;<br>мерцающий<br>зеленый;<br>свечение<br>отсутствует |

Представленные в табл. 3 параметры П<sub>1</sub> и П<sub>2</sub> могут проявляться или быть измеренными на ассоциированных с ними структурных элементах К<sub>1</sub> и И<sub>2</sub>, причем в случае

исправного элемента структуры значение параметра будет равно номиналу, а в случае неисправного — одному из нескольких элементов множества, описанного в слоте «отклонения от номинала, характеризующие неисправность». Оценивая исправность блоков  $B_1$  и  $B_2$  по одному из соответствующих параметров  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ , можно составить следующий набор соответствий:

$$s_{B1}^{(0)} \leftrightarrow r(\kappa_1, \pi_1^{(0)}): \text{«Напряжение на контакте } K_1 \text{ равно } 5B \pm 5\% \text{»};$$

$$s_{B2}^{(0)} \leftrightarrow r(\kappa_2, \pi_2^{(0)}): \text{«Цвет свечения индикатора } I_1 \text{ зеленый»}; \quad (6)$$

$$s_{B1}^{(1)} \leftrightarrow r(\kappa_1, \pi_1^{(1)}): \text{«Напряжение на контакте } K_1 \text{ от нуля до } 1,5B \text{»};$$

$$s_{B2}^{(0)} \leftrightarrow r(\kappa_2, \pi_2^{(0)}): \text{«Цвет свечения индикатора } I_1 \text{ зеленый»}.$$

Следует отметить, что каждый структурный элемент РЭА обладает определенной функциональностью, что отражается путем использования понятия функциональной задачи (функции), выполняемой элементом. При этом следует отметить, что описание неисправности на естественном языке часто выражается через нарушение функционала РЭА или одной из ее частей (структурных элементов). Это обуславливает необходимость выполнения функционального описания аппаратуры, а также нарушения ее функциональности с помощью фреймов-ролей.

При формировании фреймов-ролей основной выступают выполняемые изделием функциональные задачи и нарушения выполнения этих задач. Следовательно, для построения множества  $\Phi^{(2)}$  таких фреймов требуется определить множество всех функциональных задач  $F = \{F_1, F_2, \dots, F_N\}$ , которые могут быть использованы для отражения функциональности РЭА в целом. При этом каждой корректно выполняемой функции  $f_i^{(0)} \in F_i$  следует сопоставить множество дисфункций  $F_i^{(*)} = \{f_i^{(1)}, f_i^{(2)}, \dots, f_i^{(m)}\}$  таких, что  $F_i^{(*)} = F_i \setminus \{f_i^{(0)}\}$ , описание множества  $F_i^{(*)}$  может быть составлено из признаков  $\{p_a^{(*)}, p_b^{(*)}, \dots, p_z^{(*)}\}$  неисправно-

стей, в которых символами «(\*)» обозначено нарушение соответствующей функциональности.

Каждая функциональная задача  $F_i$  в общем случае характеризуется набором используемых (входных) параметров и результатов выполнения (выходных параметров). Эти параметры, представленные фреймами-экземплярами, могут быть определены электрическими характеристиками сигналов (частота, напряжение и т.п.) либо характеристиками и признаками другого рода (шум, запах гари, гул, мерцание индикатора и др.), как показано на рис. 2.

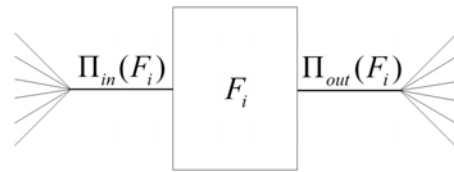


Рис. 2. Формализованное представление функциональной задачи

Для корректно выполняемой функции набор входных и выходных параметров будет соответствовать номиналу, указанному в соответствующем слоте фрейма-экземпляра каждого параметра, а при нарушении функциональности имеют место два различных случая, в зависимости от причины происхождения неисправности:

1. Внешняя причина, которая связана с появлением некорректных значений входных параметров:

$$\{\Pi_{in}(F_i) \neq \Pi_{in}(f_i^{(0)}) \Rightarrow \Pi_{out}(F_i) \neq \Pi_{out}(f_i^{(0)})\}; \quad (7)$$

2. Внутреннее происхождение дисфункции:

$$\{\Pi_{in}(F_i) = \Pi_{out}^{(0)}(f_i^{(0)}) \Rightarrow \Pi_{out}(F_i) \neq \Pi_{out}^{(0)}(f_i^{(0)})\}. \quad (8)$$

На рис. 3 в упрощенном графическом виде схематично иллюстрируются различия во внутренних различиях дисфункций  $f_i^{(1)}$  и  $f_i^{(2)}$ .

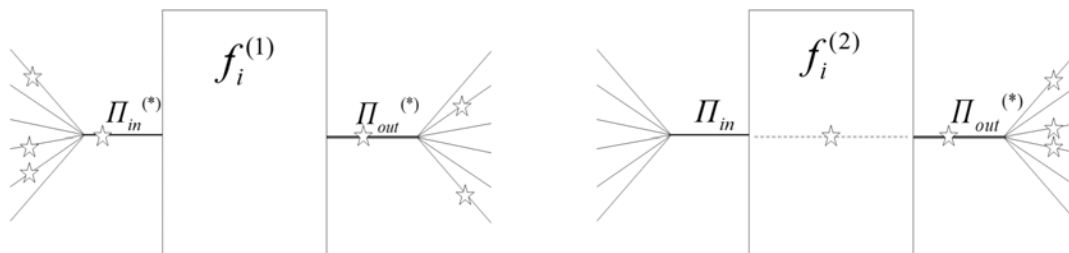


Рис. 3. Формализованное представление дисфункций:  
а) по входной группе параметров; б) внутреннего происхождения



Важно иметь в виду, что непосредственное нарушение механизма функционирования имеет место лишь в случае внутренней дисфункции  $f_i^{(2)}$  (рис. 3б). Однако, при диагностировании оба случая имеют одинаковое значение, так как для ОП первичную роль играет факт проявления дисфункции  $F_i \neq f_i^{(0)}$  по выходным параметрам  $\Pi_{\text{вых}}(F_i) \neq \Pi_{\text{вых}}(f_i^{(0)})$ , тогда, как определение причины  $\omega(d)$  этой дисфункции подлежит отысканию.

На основе вышесказанного может быть сформирована структура фрейма-роли функциональной задачи  $F_i$ , как показано в табл. 4. В этой таблице иллюстрируется связь корректно выполняемой функциональной задачи «Формирование 1-0» с дисфункциями-сателлитами «Формирование 1-1» и «Формирование 1-2».

Следует отметить, что выполнение и невыполнение функциональной задачи  $F_i$  следует рассматривать с учетом уровня разукрупнения связанных с этой задачей структурных элементов  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_N\}$ . Благодаря этому можно формально представить описание, например, следующего вида «блок  $A$  выполняет функцию  $F$ , которая состоит из подфункций  $f_1$  и  $f_2$ , выполняемых ячейками  $A_1$  и  $A_2$ », при этом для структурного уровня ячеек задачи  $f_1$  и  $f_2$  по тому же принципу представляются, как состоящие из подзадач  $f_{11}, f_{12}$ , и так далее.

Таким образом, объединение  $\Phi^{(1)} \cup \Phi^{(2)}$  фреймов-экземпляров и фреймов-ролей позволяет выполнить описание неисправностей в предметных терминах и понятиях на основе определенных классов моделей РЭА (структурной, функциональной, параметрической и другие). Однако, при выполнении операций диагностирования для ОП имеют особое значение взаимозависимость и взаимовлияние электрических сигналов. Эти понятия не имеют явного представления в сущностном и ролевом аспектах ФМ, так как являются более абстрактными и не находят

прямого отражения в структурной, функциональной и параметрической моделях РЭА.

В отличие от некоторых видов ДМ, в которых взаимозависимость и взаимовлияние параметров (например, электрических сигналов) друг относительно друга должно быть указано явно, в ЯДМ такие виды зависимостей могут быть рассчитаны автоматически на основе анализа свойств РЭА и ее состояний, описанных в слотах-ролях и их сателлитах. Анализируя данные фрейма-роли «Формирование-1», приведенного в таблице 4, следует выделить ряд неявных связей между входными и выходными параметрами, и представить их в виде следующего выражения:

$$\begin{cases} \langle p_1^{(0)}, p_2^{(0)}, p_3^{(0)} \rangle \leftrightarrow p_4^{(0)}, \\ \langle p_1^{(1)}, p_2^{(0)}, p_3^{(0)} \rangle \leftrightarrow p_4^{(1)}, \\ \langle p_1^{(0)}, p_2^{(1)}, p_3^{(0)} \rangle \leftrightarrow p_4^{(2)}. \end{cases} \quad (9)$$

Совокупность выражений (9) формально определяет взаимозависимость значений входных и выходных параметров, что позволяет представить эту зависимость в виде совокупности бинарных отношений:

$$\begin{cases} p_1 \xi p_4, \\ p_2 \xi p_4, \end{cases} \quad (10)$$

где  $\xi$  — символ наличия функциональной зависимости между параметрами.

С учетом предлагаемой структуры ЯДФМ необходимо установить соответствие между формальным представлением неисправности в виде кортежа (3), определяемым выборкой данных из объединения  $\Phi^{(1)} \cup \Phi^{(2)}$ , и предполагаемой причиной неисправности в виде текстового описания, составленного из предметных терминов. Провести

Таблица 4

Фрейм-роль функциональной задачи и ее нарушения

| Имя фрейма                         | Формирование 1-0   | Формирование 1-1  | Формирование 1-2  |
|------------------------------------|--|---|---|
| Функциональная задача (дисфункция) | Формирование   | Нарушение формирования (не формируется)   | Нарушение формирования (не формируется)   |
| Название функции (дисфункции)      | Формирование отраженного сигнала промежуточной частоты   | Нарушение формирования сигнала промежуточной частоты  | Нарушение формирования сигнала промежуточной частоты  |
| Входные параметры                  | $\Pi_1$ «Гетеродин» 30В±5%; 10,1МГц±2%;<br>$\Pi_2$ «Питание» 220 В 400 Гц;<br>$\Pi_3$ «Имп.» 0..5В строб | $\Pi_1$ «Гетеродин» 30В±5%;<br>0..10,1МГц<br>$\Pi_2$ «Питание» 220В 400 Гц;<br>$\Pi_3$ «Имп.» 0..5В строб | $\Pi_1$ «Гетеродин»<br>30В±5%; 10,1МГц±2%;<br>$\Pi_2$ «Питание» 0..220В 400 Гц;<br>$\Pi_3$ «Имп.» 0..5В строб |
| Выходные сигналы                   | $\Pi_4$ «Сигнал ПЧ1»<br>20В±5%; 2,3МГц±10%   | $\Pi_4$ «Сигнал ПЧ1»<br>20В±5%; 0..2,3МГц   | $\Pi_4$ «Сигнал ПЧ1»<br>0..1,5В; 2,3МГц±10%   |

такое соответствие в рамках ЯДФМ позволяют фреймы-сценарии, использование которых иллюстрируется в таблице 5 на примере фреймов  $\Phi_1^{(3)}$ ,  $\Phi_2^{(3)}$  и  $\Phi_3^{(3)}$  для соответствующих неисправностей А-1, А-2, А-3.

На основе сопоставления набора диагностических признаков неисправностей  $A_i$  и диагностических признаков, указанных в соответствующем слоте фрейма-сценария  $\Phi_i^{(3)}$ , может быть установлен факт принадлежности неисправностей табличному описанию, и в случае строгого соответствия может быть установлена вероятная причина  $\omega_i$  этих неисправностей, как показано в табл. 5.

Таким образом, формализованное представление ЯДФМ на основе фреймов предполагает создание множеств фреймов трех типов: фреймов-сущностей  $\Phi^{(1)}$ , фреймов-ролей  $\Phi^{(2)}$  и фреймов-сценариев  $\Phi^{(3)}$ .

Это приводит к построению диагностической модели в виде ЯДФМ, которая формально определяется следующим образом:

$$\hat{\Phi} = \Phi^{(1)} \cup \Phi^{(2)} \cup \Phi^{(3)}. \quad (11)$$

### Заключение

Использование явных диагностических фреймовых моделей, построенных на основе предлагаемого подхода, предоставляют возможность выполнения концептуального формализованного представления неисправностей РЭА с использованием предметных терминов естественного языка. Это позволяет использовать такое модельное представление в качестве основного информационного ресурса для построения естественно-языковых интерфейсов в системах информационной поддержки процесса диагностирования, что повышает уровень автоматизации выполняемых операций по диагностированию, а также способствует

сокращению времени, требуемого на восстановление сложных технических комплексов. Новизна предлагаемого подхода к концептуальной формализации неисправностей радиоэлектронной аппаратуры состоит в том, что он, в отличие от известных, позволяет напрямую оперировать терминами и понятиями предметной области технического диагностирования в конструкциях естественного языка, без необходимости их преобразования в математические нотации — элементы множеств, кортежи, матрицы и т.п., представляющие признаки неисправностей в информационных системах традиционной структуры.

### Литература

1. Федорчук А. Е. Автоматизация технического обслуживания устройств железнодорожной автоматики и телемеханики // Транспорт Российской Федерации. 2006. № 5 (5). С. 86–87.
2. Давыдов П. С. Техническая диагностика радиоэлектронных устройств и систем. М.: Радио и связь, 1988. 256 с.
3. Глуценко П. В. Концептуальная модель системы диагностирования сетевых объектов: показатели и выбор совокупности параметров при формировании // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. 2011. № 35. URL: <https://uecs.ru/article/n/kontseptualnaya-model-sistemy-diagnostirovaniya-cetevyh-obektov-pokazateli-i-vybor-sovokupnosti-parametrov-pri-formirovanii> (дата обращения: 05.06.2020).
4. Курчидис В. А., Анисимов О. В., Яценко А. В. Логико-предметный анализ схемных библиотечных элементов при автоматизированном проектировании радиоэлектронной аппаратуры // Вестник ЯВВУ ПВО. 2018. № 1(2). С. 150–158.
5. Болотова Л. С., Смольянинова В. А., Смирнов С. С. Концептуальное проектирование модели предметной области при помощи программных систем разработки баз знаний для интеллектуальных систем поддержки принятия решений. // Научные технологии. 2009. Т. 10. № 8. С. 23–28.
6. Кордюков Р. Ю., Игнатьев С. В., Тихонов В. Б., Смолкин М. А. Средства автоматизации системы управления техни-

Таблица 5

Фреймы-сценарии неисправностей Блока А

| Название                           | Неисправность А-1  | Неисправность А-2  | Неисправность А-3   |
|------------------------------------|--|--|---|
| Место неисправности                | Лампа «Блок Вкл.»  | Лампа «Блок Вкл.»  | Лампа «Блок Вкл.»   |
| Причина неисправности              | Блок А неисправен  | Перегорела лампа «Блок Вкл.»                               | Отсутствует контакт на цоколе лампы «Блок Вкл.»                   |
| Связанные диагностические признаки | Индикация 2 (дисф. 5), «Блок Вкл.» = 20 Ом±5%, Формирование-1 (дисф.1),... | Индикация 2 (дисф. 5), сопротивление лампы «Блок Вкл.» = ∞ | Индикация 2 (дисф. 5), сопротивление лампы «Блок Вкл.» = 20 Ом±5% |
| Рекомендуемый способ устранения    | Замена ячейки Б1   | Замена лампы   | Перепайка контакта 18   |
| Проявление неисправности           | Демон идентификации портрета   | Демон идентификации портрета                               | Демон идентификации портрета                                      |

ческим диагностированием радиоэлектронной аппаратуры // Программные продукты и системы. 2013. № 1. URL: [http://swsys.ru/index.php?page=9&id\\_journal=101](http://swsys.ru/index.php?page=9&id_journal=101) (дата обращения: 05.06.2020).

7. Курчидис В.А., Анисимов О.В., Яценко А.В., Пугачев А.Ю., Молоканова В.В. Многоаспектное концептуальное формализованное представление радиоэлектронной аппаратуры на основе семантических шаблонов // Материалы конференции Международной молодежной научно-практической конференции «Путь в науку. Радиотехнические системы» (Ярославль, 27 апреля 2018 г.). Ярославль: ЯрГУ, 2018. С. 152–159.

8. Приветень А.С., Пугачев А.Ю., Анисимов О.В., Курчидис В.А. Deskриптивная модель радиоэлектронной аппаратуры на основе онтологий для автоматизации информационной поддержки процесса диагностирования сложных технических комплексов // Вестник воздушно-космической обороны. 2017. № 2 (14). С. 113–119.

9. Czichos H. Technical Diagnostics: Principles, Methods, and Applications // NCSLI Measure. 2014. Vol. 9. p. 32–40.

10. Van de Riet R.P. Linguistic Instruments in Knowledge Engineering: Proceedings of the 1991 Workshop on Linguistic Instruments in Knowledge Engineering (Tilburg, The Netherlands, 17–18 January 1991). Amsterdam; New York. North-Holland; New York, N.Y. Distributors for the U.S. and Canada, Elsevier Science Pub. Co., 1992. 298 p.

11. Пугачев А.Ю., Молоканова В.В. Формирование диагностических моделей радиоэлектронной аппаратуры комплексов средств автоматизации на основе электронных документов в си-

стемах автоматизированного проектирования // Вестник ЯВВУ ПВО. 2019. № 3(6). С. 159–168.

12. Пугачев А.Ю., Татаров М.О. Подход к автоматизации формирования содержимого интерактивных электронных технических руководств для изделий сложных технических комплексов // Вестник ЯВВУ ПВО. 2019. № 3(6). С. 169–179.

13. Брусакова И.А., Сербин А.А. Объектно-ориентированный подход в моделях аккумуляции знаний о бизнес-процессах // Сборник научных трудов научно-практической конференции по современным проблемам прикладной информатики. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та., 2008. С. 11–29.

14. Сошников Д.В. Архитектура распределенной фрейм-овой иерархии для построения интеллектуальных систем распределенного накопления и многократного использования знаний // Известия ЮФУ. Технические науки. 2003. № 2. С. 51–55.

15. Жук М.А. Механизмы аккумуляции знаний для оценки эффективности бизнес-процессов // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. 2011. № 10(34). С. 60–69.

16. Ле Н.В. Интеллектуальная медицинская система дифференциальной диагностики на основе экспертных систем // Вестник СГТУ. 2014. Т. 2. № 1. С. 167–179.

17. Евсеева И.В. Фреймовая организация комплексных единиц словообразовательной системы // Вестник ИГЛУ. 2011. № 4 (16). С. 163–172.

18. Minsky M. A Framework for Representing Knowledge // ACM Digital Library. 1974. URL: <https://dl.adm.org/doi/book/10.5555/889222> (дата обращения: 25.05.2020).



## RADIO ELECTRONIC EQUIPMENT MALFUNCTION FORMALIZATION FOR COMPLICATED TECHNICAL COMPLEXES DIAGNOSTIC SYSTEMS

**ALEXEY JU. PUGACHEV,**

Yaroslavl, Russia, yavvu\_oni@mil.ru

**MAKSIM O. TATAROV,**

Yaroslavl, Russia, yavvu\_oni@mil.ru

**ANATOLIY A. MURASHOV,**

Yaroslavl, Russia, yavvu\_oni@mil.ru

### ABSTRACT

Modern models of military equipment that are in the arsenal of the Russian Aerospace Forces are technical complexes and contain a significant amount of electronic equipment. The most critical operation in recovering failures is technical diagnostics, the implementation of which is aimed at determining the likely places and causes of malfunctions. Information support for technical diagnostics is currently organized on the basis of a paper set of operational documentation, the use of which is associated with significant unproductive time delays. At the same time, well-known automation systems for information support of technical diagnostics are focused on providing diagnostic information about failures in an "implicit" form, i.e. reflect information on the reference state of the equipment, and do not directly automate the procedure for determining the cause of a malfunction by its diagnostic features. The use of the diagnostic model, reflecting the interconnection of the signs and causes of malfunctions of electronic equipment, will increase the level of automation of information support for technical diagnostics by constructing an interactive diagnostic system with an interface that provides query input and response generation in natural language constructions. The aim of the work is to create a method for formalized conceptual presentation of faults in the form of an explicit diagnostic frame model, which acts as an information resource of the dialogue diagnostic system, which can significantly reduce the time required to determine the probable places and causes of malfunctions of electronic equipment of complex technical complexes and systems. The novelty of the proposed approach to the conceptual formalization of malfunctions of electronic equipment is that it allows you to directly operate on the terms and concepts of the subject area of technical diagnostics in natural language constructions, without the need for their transformation into mathematical notations, representing signs of malfunctions in information systems of a traditional structure. The presentation of faults, made on the basis of the proposed approach, can act as the main resource of the automated system of information support for technical diagnostics, functioning on the principle of "question-an-

**KEYWORDS:** technical diagnostics; diagnostic symptom of malfunction; radio electronic equipment; conceptual formalization; explicit diagnostic models; frames.

swer" in a naturally similar language. The construction of an information interface that ensures the connection of the presented diagnostic model with the service personnel by means of requests and answers in a naturally-similar language, provides a significant reduction in the time of technical diagnostics, which reduces the overall recovery time of complex technical complexes and systems.

### REFERENCES

1. Fedorchuk A. E. Automation of maintenance of railway automation and telemechanics devices. *Transport Rossijskoj Federacii* [Transport of the Russian Federation]. 2006. No. 5(5). Pp. 86-87. (In Rus)
2. Davydov P. S. *Tekhnicheskaja diagnostika radioelektronnyh ustrojstv i sistem* [Technical diagnostics of electronic devices and systems]. Moscow: Radio I Svyaz', 1988. 256 p. (In Rus)
3. Glushhenko P. V. Conceptual model of the system for diagnosing network objects: indicators and the choice of a set of parameters when forming. *Upravlenie jekonomicheskimi sistemami: jelektronnyj nauchnyj zhurnal* [Management of economic systems: electronic scientific journal]. 2011. URL: <https://uecs.ru/article/n/kontseptualnaya-model-sistemy-diagnostirovaniya-cetevyh-obektov-pokazateli-i-vybor-sovokupnosti-parametrov-pri-formirovanii> (date of access: 05.06.2020). (In Rus)
4. Kurchidis V. A., Anisimov O. V., Jashhenko A. V. Logic-subject analysis of circuit library elements in the automated design of electronic equipment. *Vestnik Jaroslavskogo vysshego voennogo uchilishha protivovozdushnoj oborony* [Bulletin of the Yaroslavl Higher Military School of Air Defense]. 2018. No. 1(2). Pp. 150-158. (In Rus)
5. Bolotova L. S., Smol'janinova V. A., Smirnov S. S. Conceptual design of a domain model using software systems for developing knowledge bases for intelligent decision support systems. *Naukoemkie tehnologii* [Science Intensive Technologies]. 2009. Vol. 10. No. 8. Pp. 23-28. (In Rus)
6. Kordjukov R. Ju., Ignat'ev S. V., Tihonov V. B., Smolkin M. A. Au-



tomation tools for the control system for technical diagnostics of radio electronic equipment. *Programmnye produkty i sistemy* [Software and systems]. 2013. No. 1. URL: [http://swsys.ru/index.php?page=9&id\\_journal=101](http://swsys.ru/index.php?page=9&id_journal=101) (date of access: 05.06.2020). (In Rus)

7. Kurchidis V.A., Anisimov O.V., Jashhenko A.V., Pugachev A. Ju., Molokanova V.V. Mnogoaspektnoe konceptual'noe formalizovannoe predstavlenie radioelektronnoj apparatury na osnove semanticheskikh shablonov [Multidimensional conceptual formalized representation of electronic equipment based on semantic templates] *Materialy konferentsii Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Put' v nauku. Radiotekhnicheskie sistemy"* [Proc. of the International youth scientific and practical conference "The Way to science. Radio engineering systems", Yaroslavl, April 27, 2018]. Yaroslavl: Yaroslavl Demidov State University Publ., 2018. Pp. 152-159. (In Rus)

8. Priveten' A. S., Pugachev A. Ju., Anisimov O.V., Kurchidis V.A. Radio-electronic equipment descriptive model on the base of ontologies for informational support automation of complex technical systems diagnosis process. *Vestnik vozdushno-kosmicheskoy oborony* [Aerospace Defense Bulletin]. 2017. No. 2(14). Pp. 113-119. (In Rus)

9. Czichos H. Technical Diagnostics: Principles, Methods, and Applications. *NCSLI Measure Handbook of Technical Diagnostics*. Warsaw. 2014. Vol. 9. Pp. 32-40.

10. Van de Riet R.P. *Linguistic Instruments in Knowledge Engineering: Proceedings of the 1991 Workshop on Linguistic Instruments in Knowledge Engineering*. Elsevier Science Publishers, Tilburg, Netherlands. 1992. 298 p.

11. Pugachev A. Ju., Molokanova V.V. Formation of diagnostic models of electronic equipment of complexes of automation tools based on electronic documents in computer-aided design systems. *Vestnik Jaroslavskogo vysshego voennogo uchilishha protivovozdushnoj oborony* [Bulletin of the Yaroslavl Higher Military School of Air Defense]. 2019. No. 3(6). Pp. 159-168. (In Rus)

12. Pugachev A. Ju., Tatarov M.O. Interactive electronic technical manuals content forming for complicated technical complexes equipment. *Vestnik Jaroslavskogo vysshego voennogo uchilishha*

*protivovozdushnoj oborony* [Bulletin of the Yaroslavl Higher Military School of Air Defense]. 2019. No. 3(6). Pp. 169-179. (In Rus)

13. Brusakova I.A., Serbin A.A. Objektno-orientirovannyj podhod v modeljah akumuljatsii znanij o biznes-processah [Object-oriented approach in the models of accumulating knowledge about business processes]. *Collection of scientific papers of the scientific-practical conference on modern problems of applied informatics*. 2008. Vol. 9. Pp. 11-29. (In Rus)

14. Soshnikov D.V. Arhitektura raspredelennoj frejmovoj ierarhii dlja postroenija intellektual'nyh sistem raspredelennogo nakoplenija i mnogokratnogo ispol'zovanija znanij [Distributed frame hierarchy architecture for building intelligent systems of distributed accumulation and reuse of knowledge]. *Bulletin of the South Ural Federal University*. 2005. Vol. 2. Pp. 51-55. (In Rus)

15. Zhuk M.A. Mehanizmy akumuljatsii znanij dlja ocenki jeffektivnosti biznes-processov [Knowledge accumulation mechanisms for assessing the effectiveness of business processes]. *Management Of Economic Systems: A Scientific Electronic Journal*. 2011. No. 10(34). Pp. 60-69. (In Rus)

16. Le N.V. An intelligent medical differential diagnosis system based on expert systems. *Vestnik Saratov State Technical University*. 2014. Vol. 2. No. 1. Pp. 167-179. (In Rus)

17. Evseeva I.V. The frame organization of word-formation system's complex units. *Bulletin of Irkutsk State Linguistic University*. 2011. No. 4 (16). Pp. 163-172. (In Rus)

18. Minsky M. *A Framework for Representing Knowledge*. ACM Digital Library. 1974. URL: <https://dl.adm.org/doi/book/10.5555/889222> (date of access: 25.05.2020).

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Pugachev A.Ju., PhD, Deputy Head of the Research Division of the Yaroslavl Higher Military Institute of Anti-Air Defense;  
Tatarov M.O., PhD, Docent, Head of the Research Division of the Yaroslavl Higher Military Institute of Anti-Air Defense;  
Murashov A.A., PhD, Docent, Professor of the Yaroslavl Higher Military Institute of Anti-Air Defense.

---

**For citation:** Pugachev A.Ju., Tatarov M.O., Murashov A.A. Radio electronic equipment malfunction formalization for Complicated Technical Complexes Diagnostic Systems. *H&ES Research*. 2020. Vol. 12. No. 4. Pp. 44-55. doi: 10.36724/2409-5419-2020-12-4-44-55 (In Rus)



doi: 10.36724/2409-5419-2020-12-4-56-64

## ПРИМЕНЕНИЕ ФРЕЙМВОРКА H2O В ОБРАБОТКЕ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

**БУНЯКИНА**  
**Екатерина Витальевна<sup>1</sup>**

**ГАЛЬЧЕНКО**  
**Максим Иванович<sup>2</sup>**

### АННОТАЦИЯ

В настоящее время одной из востребованных сфер продвинутой аналитики является анализ временных рядов. Примерами генерации такого рода данных могут служить сохраняемые данные измерительных приборов, детекторов различного рода. На рынке присутствует достаточно небольшое количество предложений комплексных платформ для построения моделей глубокого обучения. В этой ситуации платформа (фреймворк) H2O является уникальным предложением, в силу бесплатности, комплексности, низкого порога входа и масштабируемости. Особый интерес к фреймворку диктуется также и тем, что разработчики предусмотрели возможность получения доступа к алгоритмам платформы в языках R и Python с помощью библиотек, а также наличия приложения Sparkling Water для Apache Spark. В аналитической платформе KNIME версии 4 в группе узлов KNIME Labs, Deep Learning имеются хорошо настраиваемые узлы, способные вызывать соответствующие алгоритмы H2O. На текущий момент реализованы ещё не все алгоритмы H2O, но процесс развития KNIME позволяет рассчитывать на то, что скоро будет реализовано и всё оставшееся. В работе приводятся общие сведения, а также пример использования платформы к задаче прогнозирования временных рядов. Показываются порядок применения функций, основные параметры настройки, а также особенности вызова, возникающие при работе на одиночном персональном компьютере при работе на языке R. Описывается процесс взаимодействия с web-интерфейсом и реализация функций в языке статистического программирования R. Продемонстрировано использование результатов моделирования, а именно относительной важности предикторов, в H2O для упрощения набора данных и повышения скорости сходимости алгоритма.

### Сведения об авторах:

<sup>1</sup>старший преподаватель Военно-морского политехнического института "Военный учебно-научный центр Военно-Морского Флота «Военно-морская академия им Н. Г. Кузнецова», г. Пушкин, Россия

<sup>2</sup>старший преподаватель, аспирант Санкт-Петербургского аграрного университета, г. Пушкин, Россия, maxim.galchenko@gmail.com

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** языки программирования; алгоритмы фреймворк; модель; обработка данных; стэкинг.

**Для цитирования:** Бунякина Е. В., Гальченко М. И. Применение фреймворка H2O в обработке временных рядов // Научные исследования в космических исследованиях Земли. 2020. Т. 12. № 4. С. 56–64. doi: 10.36724/2409-5419-2020-12-4-56-64





## Введение

В настоящее время одной из востребованных сфер продвинутой аналитики является анализ временных рядов. Примерами генерации такого рода данных могут служить сохраняемые данные измерительных приборов, детекторов различного рода. При этом, накапливаемые данные по объёму достигают размеров, с которыми затруднительно работать привычными способами.

В настоящее время для обработки такого рода данных активно применяются языки программирования R и Python с применением облачных платформ или локально, но с использованием одного из фреймворков. К наиболее часто встречаемым относятся фреймворки глубокого обучения Tensorflow, PyTorch, а также Open Source фреймворк H2O [1].

Фреймворк H2O разрабатывается, в том числе, как отдельно стоящая полноценная платформа для машинного анализа, ядро которой написано на Java. На самом деле, фреймворк самодостаточен, вся работа по моделированию может быть выполнена с применением H2O Flow. H2O Flow напоминает ноутбуки Python, типа Jupyter Notebook, работа в них достаточно хорошо описана в документации.

Платформа может быть запущена как на локальном компьютере, так и на кластере. Доступны библиотеки для использования фреймворка в R [2], Python. Последняя версия KNIME Analytics Platform [3] содержит узлы, позволяющие выполнять операции по анализу данных с помощью данного фреймворка. Стоит обратить внимание на то, что для Apache Spark разработано приложение Sparkling Water, функционал которого полностью перекрывает H2O. Таким образом, код может быть портирован в облако, что даёт возможность производить расчёты в случае больших объёмов данных. В настоящее время компания — разработчик активно продвигает на рынок продукт H2O Driverless AI, который позволяет строить модели в максимально автоматическом режиме. Для данного продукта сформирована академическая инициатива, позволяющая получить ключ для исследования возможностей продукта как преподавателям ВУЗов, так и студентам в индивидуальном порядке.

## Обсуждение

В данной работе мы покажем кейс применения H2O для анализа временных рядов в R и коснёмся возможностей применения KNIME Analytics Platform для данных целей.

Для анализа и прогнозирования в случае временных рядов могут быть использованы следующие алгоритмы, реализованные в H2O:

- Isolation Forest [4] для анализа выбросов во временном ряду;
- Gradient Boosting Machine (GBM) [5], Deep Learning (Neural Networks)[6], Distributed Random Forest (DRF) и стэкированные модели.

Следует отметить наличие возможностей для получения стэкированных моделей в автоматическом режиме и подбора гиперпараметров на сетках, в случае наличия таковых у применяемого алгоритма. Вообще, H2O даёт возможность поиска оптимальных значений гиперпараметров с помощью Random Grids.

Обработка данных в H2O, вне зависимости от того, что используется для вызова алгоритмов фреймворка, состоит из следующих шагов:

1. Запуск фреймворка, если таковой требуется. По умолчанию, в случае использования локальной установки, доступ к фреймворку может быть получен с помощью веб-интерфейса с использованием порта 54321 (при использовании KNIME Analytics Platform веб-интерфейс не стартует). На этом этапе возможно указывать количество ядер процессора (R), задействованных при обработке данных. Если задействуются все ядра, операционная система практически перестаёт отвечать, поэтому мы в своих экспериментах, оставляли одно ядро за системой. Также важно учесть и то, что в случае использования R объём используемой памяти не контролируется, что приводит к зависанию кода без исполнения каких-либо действий в случае, когда объём данных и необходимый объём памяти для построения модели превышает доступный.

2. Преобразование наборов данных и, при необходимости, разбиение на тестовую, обучающую и валидационную выборки. Здесь необходимо учитывать, что построение выборок идёт одним доступным методом: случайная выборка, что абсолютно не подходит для анализа временных рядов.

3. Вызов процедур H2O и построение моделей. Фреймворк содержит достаточный функционал для тестирования и кросс-валидации моделей.

4. Сохранение моделей в бинарном виде, либо MOJO или POJO форматах для дальнейшего использования. Следует отметить одну тонкость: понятно, что для увеличения скорости работы и удобства в продакшене является желание сохранять бинарную модель. Однако, бинарная модель не может быть использована при различиях в версиях фреймворка при тренировке и в продакшене. Нет ни прямой, ни обратной совместимости — модель должна быть перетренирована для используемой версии фреймворка.

Если говорить о KNIME Analytics Platform может быть получен достаточно компактный поток (рис. 1) для построения модели.

В данном случае показан фрагмент потока, который использовался для применения градиентного бустинга к задаче классификации. Как видно, для кросс-валидации используются возможности фреймворка, но, при этом, результат из кросс-валидационного цикла, ограниченного узлами H2O Cross Validation Loop Start и Loop End, пере-

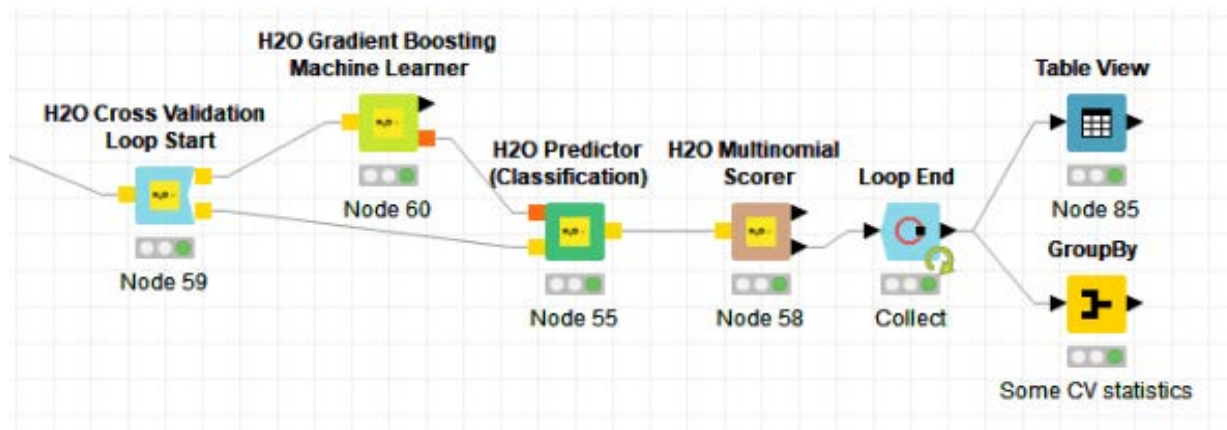


Рис. 1. Фрагмент потока KNIME Analytics Platform, отвечающий за кросс-валидацию модели GBM

даются в поток KNIME в понятном для него формате, хотя большая часть действий выполняется во фреймворке.

В R нами данный фреймворк использовался для анализа временного ряда, состоящего из порядка 300 тысяч измерений прогнозируемой величины, исторические данные покрывают приблизительно 2.5 года. Особенностью было то, что измерения проводились на 21 точке, и модель должна строиться в максимально автоматическом режиме, желательно без участия аналитика в подборе параметров, для каждой из точек. Горизонт прогноза — 48 шагов. На данный процесс большое влияние оказывают погодные условия, что привело к необходимости получения исторических погодных данных и прогноза.

После добавления экзогенных переменных (данных о погодных условиях), а также организации достаточного количества лагов, количество полей изначально составило 4000 (переменная `historical.data.division` в примерах далее). Так как объём данных достаточно велик, предпочтение в предобработке данных отдавалось библиотеке `data.table`.

Для упрощения разработки системы были созданы три референсных класса (RefClass) R (рис. 2):

`Environment` — для создания окружения для моделирования. В классе реализованы действия для формирования истории по всем точкам измерений, включая данные погодных условий, исходя из описания места расположения и наличия метеостанций вблизи объекта, на котором проводятся измерения. При формировании истории используются данные метеостанций сайта <https://rp5.ru>, а для получения прогнозов — данные, получаемые с помощью API сайта `OpenWeather.com`.

`StatisticalModelsFitting` — для формирования статистических моделей по каждой из точек. Статистическое

моделирование использовалось как для апробации, так и для повышения качества прогнозов и ускорения сходимости. Для данного типа моделирования применялись алгоритмы SSA[7], TBATS и Prophet[8].

`DeepModels` — для построения моделей с помощью алгоритмов, реализованных в H2O. В настоящее время для изучения отобраны градиентный бустинг и нейронные сети.

Классы формировались исходя из функционала, реализующегося в продукте, фактически, отражают поток данных. В настоящее время рассматривается целесообразность реализации классов на уровне объектов, нпо которым ведётся процесс прогнозирования.

При анализе данных были выявлены следующие особенности:

- Временные ряды имеют достаточно сложную структуру. С помощью периодограммы Ломба-Скаргла (Lomb-Scargle Periodogram) были выявлены наиболее общие периоды в 8, 12, 24, 84, 168 часов. Набор периодов уникален для каждой точки измерения.

- Статистическое моделирование даёт не вполне удовлетворительные результаты, однако можно отметить, что каждый из методов выделяет некоторые особенности ряда, что даёт возможность использовать данные статистического моделирования как дополнительные предикторы.

- При прогнозировании на полном наборе данных, со всеми возможными лагами на 14 суток назад было выявлено, что основную роль в прогнозе играют данные, соответствующие 48, 72, 96 и т.д. сдвигу и соответствующие им, сдвинутые на 3–4 лага максимум, значения (лаги 49, 50, 51 и т.п., рис. 3). Для этого использовались показатели относительной важности предикторов, которые могут быть получены для всех типов моделей в H2O.

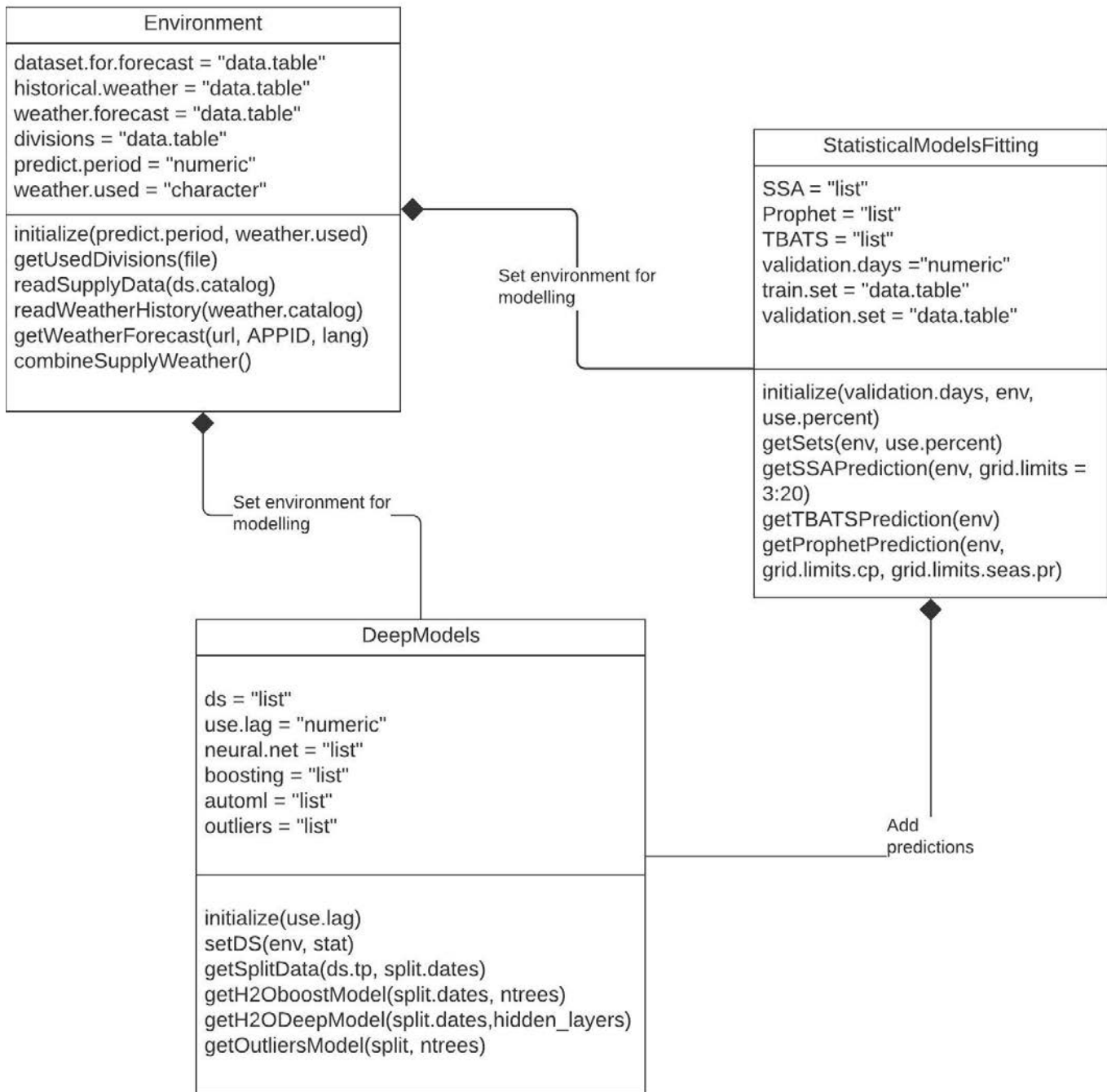
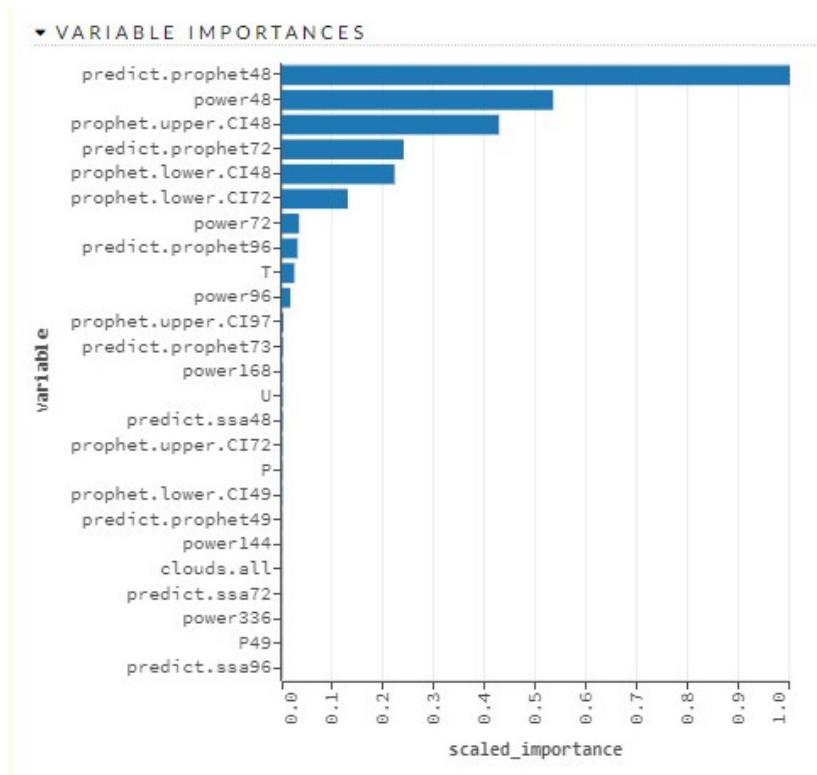


Рис. 2. UML модель классов, реализованных в процессе решения задачи



**Рис. 3.** Пример диаграммы, показывающей важность составляющих в сформированной модели. Число в названии фактора соответствует лагу. Видно, что основными факторами являются факторы со сдвигом в 48, 72, 96 часов, а также текущие температура (Т), влажность (U) и давление (P)

Подключение библиотеки h2o, инициализация, экспорт данных и их разбиение на обучающую, валидационную и тестовые выборки представляют собой достаточно компактный код (рис. 4) в R Language.

1. library(h2o)
2. h2o.init(nthreads = 3)
3. ....
4. h2o.ds <- as.h2o(historical.data.division)
5. splits <- .self\$getSplitData(.self\$ds[[tp]], split.dates)
6. train <- as.h2o(splits[["train.ds"]][, -c("etime")])
7. valid <- as.h2o(splits[["validation.ds"]][, -c("etime")])
8. test <- as.h2o(splits[["test.ds"]][, -c("etime")])
9. rm(splits)
10. ....

**Рис. 4.** Код инициализации фреймворка и подготовки данных. В строке 5 используется функция для получения разбиения на необходимые выборки, с учётом того, что работа идёт с временным рядом

К особенностям фреймворка с точки зрения подготовки данных стоит отнести:

- Отсутствие необходимости в преобразовании категориальных переменных (one-hot encoding). Фреймворк делает при необходимости это сам.
- Отсутствие необходимости предварительной нормализации данных. Данный элемент предобработки может быть задан как параметр соответствующей функции.
- При общей “лояльности” R к символам кириллицы в названиях полей и наличию в них некорректных символов, с точки зрения самого языка программирования, H<sub>2</sub>O плохо справляется с такими отклонениями.
- Если сумма долей в разбиении, при использовании функции h2o.splits() не равна единице, будет создана третья выборка. Предполагается, что доли соответствуют обучающей, валидационной и тестовой выборкам. Функция h2o.assign() может быть использована для формирования этих выборок в явном виде в окружении R.

Для прогнозирования были выбраны алгоритмы Gradient Boosting Machine (GBM), Deep Learning (Neural Networks). Если говорить о Deep Learning, то в H<sub>2</sub>O может быть построена многослойная нейронная сеть, при этом могут быть заданы кроме количества нейронов по



слоям и функция активации нейронов в сети, процент дроп-аута для каждого из слоёв, а также параметры обучения, такие как параметры регуляризации и досрочного останова, для построения модели используется функция `h2o.deeplearning()`. В кейсе, который используется в качестве примера в данной работе, была выбрана трёхслойная архитектура нейронной сети, параметры которой хорошо читаются в коде (рис. 5).

```

1. nn1 <- h2o.deeplearning(training_frame = train,
validation_frame = valid,
2. x = predict.x, y ="predicted.var",
3. model_id = "NN_type",
4. hidden = c(800, 800),
5. activation = "Rectifier",
6. epochs = 100,
7. seed = 2000000,
8. stopping_metric = "RMSE",
9. stopping_tolerance = 0.005,
10.stopping_rounds = 2)
11.finalnn_predictions<-h2o.predict(
12.object = nn1,
13.newdata = test)

```

**Рис. 5.** Вызов функции `h2o.deeplearning()` для построения нейронной сети

Как видно из кода, строится полносвязная сеть с двумя скрытыми слоями по 800 нейронов (строка 4), активационная функция — Rectifier (строка 5). Независимые переменные и целевая переменная передаются с помощью названий полей (строковые векторы, строка 2). Максимальное количество эпох — 100 (строка 6), но при достаточно малых различиях в двух последовательных шагах метрики RMSE (строки 8–10) обучение останавливается.

Аналогичным образом может быть проделано построение моделей и для градиентного бустинга (Gradient Boosting Machine (GBM), функция `h2o.gbm()` рис. 6).

В нашем случае точность получаемого прогноза оказалась достаточно высока (рис. 7).

Если говорить о такой метрике, как  $R^2$ , то значения на тестовой выборке не опускались ниже 0.98, а процент-

```

1. gbm <- h2o.gbm(
2. training_frame = train,
3. validation_frame = valid,
4. x = predict.x,
5. y ="power",
6. ntrees = ntrees,
7. learn_rate = 0.05,
8. max_depth = 50,
9. sample_rate = 0.8,
10.col_sample_rate = 0.8,
11.min_rows = 30,
12.stopping_rounds = 3,
13.stopping_tolerance = 0.001,
14.stopping_metric = "RMSE",
15.score_each_iteration = T,
16.model_id = paste0("gbm_", tp),
17.seed = 2000000)
18.finalgbm_predictions<-h2o.predict(
19.object = gbm,
20.newdata = test)

```

**Рис. 6.** Вызов функции `h2o.gbm()` для обучения модели

ная ошибка за 24 шага не поднималась выше 6%, что превосходит используемую в настоящий момент заказчиком модель по большинству точек измерений. В рассматриваемом наборе данных присутствует ряд точек, для которых попытки прогнозирования окончились неудачно.

В настоящее время на рынке активно продвигаются средства моделирования, позволяющие строить модели максимально автоматизированным способом, без подбора гиперпараметров с участием исследователя, а также с возможностью построения ансамбля моделей. В случае описываемого фреймворка, таковым инструментом является функция `h2o.automl()`, которая позволяет достаточно эффективно строить модели с использованием стэкинга, который часто используется для построения подобного рода моделей [9–11] (рис. 8).

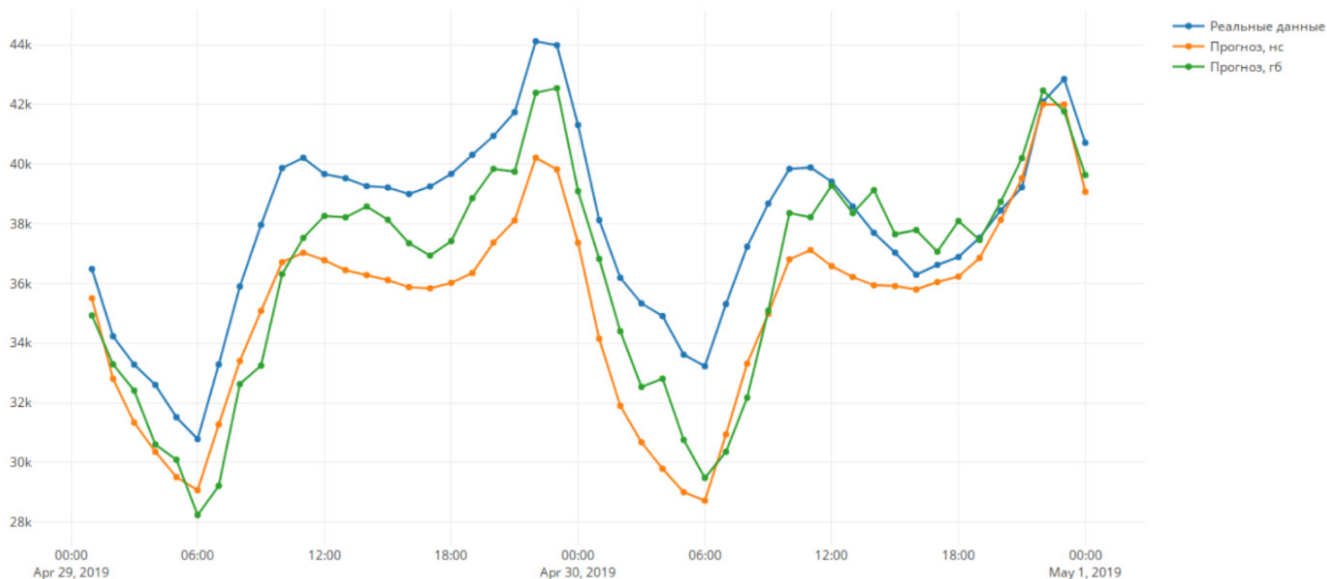


Рис. 7. Результат прогнозирования на тестовой выборке: GBM показал лучшие результаты

```

1. automl.tp <- h2o.automl(
2. training_frame = train,
3. validation_frame = valid,
4. x = predict.x,
5. y = "power",
6. sort_metric = "RMSE",
7. project_name = paste0("auto_", tp),
8. include_algos = c("DRF", "GBM", "DeepLearning",
"StackedEnsemble"),
9. max_runtime_secs = 3600*3,
10. stopping_rounds = 2, ##
11. stopping_tolerance = 0.01,
12. stopping_metric = "RMSE", ##
13. seed = 2000000)
    
```

Рис. 8. Построение и выбор наилучших моделей с использованием стэкинга

При использовании стэкинга моделирование ведётся в два этапа: на первом этапе обучается группа моделей на основе входных данных. На втором этапе результаты прогнозирования моделей первого этапа используются для прогнозирования результатов с помощью некоторой обобщающей модели.

Огромной проблемой при реализации данной модели явилось то, что вычисления проводятся на CPU, к сожалению GPU не может быть использован в случае H2O. Это приводит к достаточно длительным расчётам, не всегда укладывающимся в максимально допустимое время. Если превышение составило хотя бы доли секунды — модель не достраивается.

### Заключение

На текущий момент ведётся эксперимент по сравнению полученных результатов с результатами, получаемыми с помощью фреймворка tensorflow (используется библиотека keras), а делается попытка использования стэкинг-моделей, генерируемых H2O. Стоит отметить, что для ряда точек измерений не удалось построить значимой модели (четыре точки из 21), что даёт повод для дальнейших исследований.



## Литература

1. *Landry M., Aiello S., Eckstrand E., Fu A., Aboyou P.* Machine Learning with R and H2O. 2018. URL: <https://www.h2o.ai/wp-content/uploads/2018/01/RBooklet.pdf> (дата обращения 02.08.2020).
2. *LeDell E., Gill N., Aiello S., Fu A., Candel A., Click C., Kraljevic T., Nykodym T., Aboyou P., Kurka M., Malohlava M., Rehak L., Eckstrand E., Hill B., Vidrio S., Jadhawani S., Wang A., Peck R., Wong W., Gorecki J., Dowle M., Tang Y., DiPerna L.* h2o: R Interface for the 'H2O' Scalable Machine Learning Platform. Version: 3.30.0.1. 2020. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=h2o> (дата обращения 02.08.2020).
3. *Berthold M.R., Cebron N., Dill F., Gabriel T.R., Kötter T., Meinl T., Ohl P., Sieb C., Thiel K., Wiswedel B.* KNIME: The Konstanz Information Miner // Data Analysis, Machine Learning and Applications: Proceedings of the 31st Annual Conference of the Gesellschaft für Klassifikation e.V., Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, March 7–9, 2007. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008. Pp 319–326.
4. *Liu F.T., Ting K., Zhou Z.H.* Isolation Forest // Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Data Mining (ICDM 2008) (Pisa, Italy, 15–19 December 2008). IEEE, 2008. Pp.413–422. DOI: 10.1109/ICDM.2008.17
5. *Malohlava M., Candel A.* Gradient Boosting Machine with H2O. Mountain View, CA: H2O.ai, Inc, 2020. URL: <http://docs.h2o.ai/h2o/latest-stable/h2o-docs/booklets/GBMBooklet.pdf> (дата обращения 02.08.2020).
6. *Candel A., LeDell E.* Deep Learning with H2O. Mountain View, CA: H2O.ai, Inc, 2020. URL: <http://docs.h2o.ai/h2o/latest-stable/h2o-docs/booklets/DeepLearningBooklet.pdf> (дата обращения 02.08.2020).
7. *Golyandina N., Korobeynikov A.* Basic Singular Spectrum Analysis and Forecasting with R // Computational Statistics and Data Analysis. Vol. 71. Pp. 934–954.
8. *Taylor S., Letham B.* Prophet: Automatic Forecasting Procedure. Version: 0.6.1. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=prophet> (дата обращения 02.08.2020).
9. *Ma Z., Wang P., Gao Z., Wang R., Khalighi K.* Ensemble of machine learning algorithms using the stacked generalization approach to estimate the warfarin dose // PLoS ONE. 2018. No. 13(10): e0205872. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0205872>
10. *Sikora R., Al-laymoun O.H.* A Modified Stacking Ensemble Machine Learning Algorithm Using Genetic Algorithms // Journal of International Technology and Information Management. 2014. Vol. 23. No. 1. Pp. 1–12.
11. *Divina F., Gilson A., Gómez-Vela F., García Torres M., Torres J.F.* Stacking Ensemble Learning for Short-Term Electricity Consumption Forecasting // Energies. 2018. No. 11 (4). P. 949. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11040949>

## APPLICATION OF H2O FRAMEWORK IN TIME SERIES PROCESSING

**EKATERINA V. BUNYAKINA,**

St. Petersburg, Russia, ninapetergof@mail.ru

**MAXIM I. GALCHENKO,**

St. Petersburg, Pushkin, Russia, maxim.galchenko@gmail.com

**KEYWORDS:** programming languages; algorithms framework; model; data processing; stacking.

### ABSTRACT

Currently, one of the most popular advanced analytics area is time series analysis. Stored data of measuring instruments, detectors of various kinds can serve as examples of generating this kind of data. There are quite a few integrated platforms proposals on the market for building deep learning models. In this situation, the H2O platform (framework) is a unique offer, due to its free, comprehensive, low entry threshold and scalability. Particular interest in the framework is also dictated by the fact that the developers have provided the opportunity to access the platform algorithms in R and Python using libraries, as well as the availability of the Sparkling Water application for Apache Spark. In the KNIME Analytics Platform 4.X, the KNIME Labs – Deep

Learning node group has well-tuned nodes that can invoke the corresponding H2O algorithms. Currently, not all H2O algorithms have been implemented yet, but the KNIME development process allows us to expect that everything remaining will be implemented soon. The article provides general information, as well as an example of using the platform for the task of time series forecasting. The order of the functions in the code, the basic settings, as well as the call features that occur when working on a single PC while working in R are shown. The process of interaction with the web interface and the implementation of functions in the statistical programming language R is described. The use of simulation results, namely, relative importance, is demon-



strated. predictors in H2O to simplify the data set and increase the rate of convergence of the algorithm.

#### REFERENCES

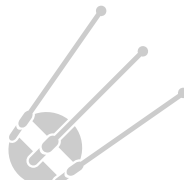
1. Landry M., Aiello S., Eckstrand E., Fu A., Aboyou P. Machine Learning with R and H2O. 2018. URL: <https://www.h2o.ai/wp-content/uploads/2018/01/RBooklet.pdf> (date of access 02.08.2020).
2. LeDell E., Gill N., Aiello S., Fu A., Candel A., Click C., Kraljevic T., Nykodym T., Aboyou P., Kurka M., Malohlava M., Rehak L., Eckstrand E., Hill B., Vidrio S., Jadhawani S., Wang A., Peck R., Wong W., Gorecki J., Dowle M., Tang Y., DiPerna L. h2o: R Interface for the 'H2O' Scalable Machine Learning Platform. Version: 3.30.0.1. 2020. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=h2o> (date of access 02.08.2020).
3. Berthold M.R., Cebon N., Dill F., Gabriel T.R., Kötter T., Meinl T., Ohl P., Sieb C., Thiel K., Wiswedel B. KNIME: The Konstanz Information Miner. *Data Analysis, Machine Learning and Applications: Proceedings of the 31st Annual Conference of the Gesellschaft für Klassifikation e.V., Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, March 7-9, 2007*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008. Pp 319-326.
4. Liu F.T., Ting K., Zhou Z.H. Isolation Forest. *Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Data Mining (ICDM 2008)* (Pisa, Italy, 15-19 December 2008). IEEE, 2008. Pp.413-422. DOI: 10.1109/ICDM.2008.17.
5. Malohlava M., Candel A. Gradient Boosting Machine with H2O. Mountain View, CA: H2O.ai, Inc, 2020. URL: <http://docs.h2o.ai/h2o/latest-stable/h2o-docs/booklets/GBMBooklet.pdf> (date of access 02.08.2020).
6. Candel A., LeDell E. Deep Learning with H2O. Mountain View, CA: H2O.ai, Inc, 2020. URL: <http://docs.h2o.ai/h2o/latest-stable/h2o-docs/booklets/DeepLearningBooklet.pdf> (date of access 02.08.2020).
7. Golyandina N., Korobeynikov A. Basic Singular Spectrum Analysis and Forecasting with R. *Computational Statistics and Data Analysis*. Vol. 71. Pp. 934-954
8. Taylor S., Letham B. Prophet: Automatic Forecasting Procedure. Version: 0.6.1. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=prophet> (date of access 02.08.2020).
9. Ma Z., Wang P., Gao Z., Wang R., Khalighi K. Ensemble of machine learning algorithms using the stacked generalization approach to estimate the warfarin dose. *PLoS ONE*. 2018. No. 13(10): e0205872. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0205872>
10. Sikora R., Al-laymoun O.H. A Modified Stacking Ensemble Machine Learning Algorithm Using Genetic Algorithms. *Journal of International Technology and Information Management*. 2014. Vol. 23. No. 1. Pp. 1-12.
11. Divina F., Gilson A., Gómez-Vela F., García Torres M., Torres J.F. Stacking Ensemble Learning for Short-Term Electricity Consumption Forecasting. *Energies*. 2018. No. 11 (4). P. 949. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11040949>

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Bunyakina E.V., Lecturer of Military Institute (Naval Polytechnic) Military Educational and Scientific Center of the Navy «Naval Academy»;  
Galchenko M.I., Lecturer of St. Petersburg agrarian University.

---

**For citation:** Bunyakina E.V., Galchenko M. I. Application of H2O framework in time series processing. *H&ES Research*. 2020. Vol. 12. No. 4. Pp. 56-64. doi: 10.36724/2409-5419-2020-12-4-56-64 (In Rus)







doi: 10.36724/2409-5419-2020-12-4-65-75

# МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ДЕЛ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА

**КОРОЛЕВ**  
**Игорь Дмитриевич<sup>1</sup>**

**НАЗИНЦЕВ**  
**Вадим Сергеевич<sup>2</sup>**

**МЕЗЕНЦЕВ**  
**Александр Сергеевич<sup>3</sup>**

**МАХНЕВ**  
**Александр Павлович<sup>4</sup>**

## АННОТАЦИЯ

Предметом исследования является процесс формирования электронных дел в системах электронного документооборота. Целью исследования является разработка методики формирования электронных дел в системах электронного документооборота, удовлетворяющая требованиям нормативных правовых актов, предъявляемых к ведению делопроизводства и архивного дела, информационным технологиям в федеральных органах исполнительной власти Российской Федерации. В ходе проведенного исследования разработан алгоритм формирования электронных дел в системах электронного документооборота. Процесс формирования электронных дел декомпозирован на восемь этапов. Для решения поставленной задачи создана база данных реквизитов документов и ключевых слов в них, содержащая перечень реквизитов, видов формализованных документов, ключевых слов. Для формализации интеллектуальной деятельности должностных лиц построены модели реквизитов документов, видов документов, статей ведомственного перечня документов со сроками их хранения, контуров системы электронного документооборота, в которых был создан и хранится электронный документ, сроков хранения электронных документов. В разработанной методике интеллектуальная деятельность должностных лиц федеральных органов исполнительной власти Российской Федерации по выявлению нанесенных на электронный документ реквизитов, определению вида формализованного электронного документа, определению должностного лица (структурного подразделения), к чьей области информационной ответственности относится электронный документ, статьи ведомственного перечня документов со сроками их хранения, к которому относится документ, определения срока его хранения и электронного дела, в которое документ должен быть распределен, формализуется с использованием логики предикатов. Методика позволяет формировать электронные дела автоматически, может быть использована при проектировании перспективных систем электронного документооборота и создании отдельных программных модулей, реализующих функцию автоматического формирования электронных дел в системах электронного документооборота.

## Сведения об авторах:

<sup>1</sup>д.т.н., профессор, профессор Краснодарского высшего военного училища, г. Краснодар, Россия, pi\_korolev@mail.ru

<sup>2</sup>адъюнкт Краснодарского высшего военного училища им. генерала армии С.М. Штеменко, г. Краснодар, Россия, lazo12@list.ru

<sup>3</sup>адъюнкт Краснодарского высшего военного училища имени генерала армии С.М. Штеменко, г. Краснодар, Россия, ravings13@inbox.ru

<sup>4</sup>курсант Краснодарского высшего военного училища имени генерала армии С.М.Штеменко, г. Краснодар, Россия, a23632@yandex.ru

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** методика; система электронного документооборота; электронное дело; электронный документ; автоматическое формирование электронного дела.

**Для цитирования:** Королев И. Д., Назинцев В.С., Мезенцев А. С., Махнев А. П. Методика формирования электронных дел системы электронного документооборота // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2020. Т. 12. № 4. С. 65-75. doi: 10.36724/2409-5419-2020-12-4-65-75

### Введение

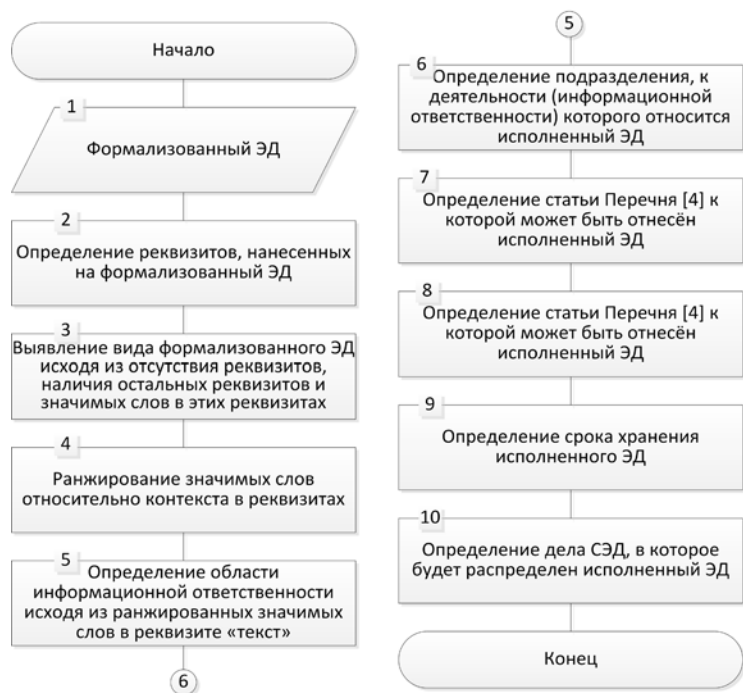
В настоящее время быстрыми темпами осуществляется повсеместное внедрение информационных и коммуникационных технологий, направленных на развитие информационного общества, формирование национальной цифровой экономики, обеспечение национальных интересов и реализация стратегических национальных приоритетов [1–3]. Для достижения этих целей в Федеральных органах исполнительной власти (ФОИВ) и организациях внедряются и применяются системы электронного документооборота (СЭД) [4]. В приказе руководителя Федерального архивного агентства Российской Федерации от 22 мая 2019 года № 71 основными процессами обработки электронных документов в СЭД определены: первичная обработка документов, их регистрация, предварительное рассмотрение, передача руководству на рассмотрение, передача исполнителям на исполнение, определение места хранения документов и включение документов в дела. Анализ функциональных возможностей существующих СЭД показал, что отдельные процессы, например формирование электронных дел, выполняются оператором (должностным лицом подразделения делопроизводства) [5]. Учитывая требования нормативных правовых актов и недостатки применяемых СЭД в ФОИВ, актуальной научной задачей представляется разработка методики формирования электронных дел СЭД, которая позволит выполнять этот процесс автоматически.

### Основная часть

При построении методики формирования электронных дел СЭД осуществляется формализация процессов интеллектуальной деятельности исполнителя и делопроизводителя, выполняемая ими при распределении исполненных электронных документов (ЭД) в электронные дела (формировании электронных дел), для чего наиболее подходящим математическим аппаратом является логика предикатов [6, 7].

В соответствии с требованиями приказа руководителя Федерального архивного агентства Российской Федерации от 22 мая 2019 года № 71 в ФОИВ все документы после их исполнения хранятся в электронном виде в соответствующих разделах и подразделах СЭД, которые соответствуют наименованиям дел в номенклатуре дел. Необходимо отметить, что перечень видов формализованных документов, передаваемых в электронном виде при информационном взаимодействии, определен правилами обмена документами в электронном виде при организации информационного взаимодействия, утвержденными постановлением Правительства Российской Федерации от 25 декабря 2014 года № 1494. Документы, создаваемые и (или) поступившие в ФОИВ на бумажном носителе, включаются в СЭД, для чего сведения о документе вносятся в электронную регистрационную карточку СЭД, путем сканирования и присоединения электронных копий документов к электронной регистрационной карточке СЭД.

Структуру методики раскрывает алгоритм действий при выполнении процесса автоматического формирования дел СЭД (рис. 1).



Структурная схема алгоритма, реализующего последовательность действий при распределении исполненных ЭД в электронные дела СЭД



В соответствии с требованиями приказа Минкомсвязи Российской Федерации от 02 сентября 2011 года № 221 и приказа руководителя Федерального архивного агентства Российской Федерации от 22 мая 2019 года № 71, каждое электронное дело, включенное в электронную номенклатуру дел организации в СЭД, описывается следующим набором данных, представленных в кортеже (1):

$$E = \langle 1, N^{\Delta}, m^{\Delta}, t^{\Delta b}, t^{\Delta e}, Q^{\Delta}, t^{\Delta}, s, H, \zeta \rangle, \quad (1)$$

где  $E$  — электронная номенклатура электронных дел;

$1$  — индекс электронного дела,  $t \in \{1, t^i\}$ , где  $t^i$  — количество дел номенклатуры воинской части;

$N^{\Delta}$  — наименование электронного дела,  $N^{\Delta} \in \{N^{\Delta}\}$ , где  $N^{\Delta}$  — множество возможных наименований дел номенклатуры;

$m^{\Delta}$  — мандатная метка электронного дела,  $m^{\Delta} \in \{m^{\Delta}\}$ , где  $m^{\Delta}$  — множество возможных мандатных меток определенных текущей политикой безопасност и СЭД;

$t^{\Delta b}$  — дата начала электронного дела,  $t^{\Delta b} \in \{t\}$ , где  $t$  — множество возможных дат;

$t^{\Delta e}$  — дата окончания электронного дела,  $t^{\Delta e} \in \{t\}$ , где  $t$  — множество возможных дат;

$Q^{\Delta}$  — объем информации, содержащейся в электронном деле в мегабайтах,  $Q^{\Delta} \in \{Q\}$ , где  $Q$  — множество целых чисел;

$t^{\Delta}$  — период хранения электронного дела в соответствии с требованиями ведомственного перечня документов со сроками их хранения, например перечень типовых управленческих архивных документов, образующихся в процессе деятельности государственных органов, органов местного самоуправления и организаций, с указанием сроков хранения, утвержденных приказом руководителя Федерального архивного агентства Российской Федерации от 20 декабря 2019 года № 236, в годах,  $t^{\Delta} \in \{Q\}$ , где  $Q$  — множество целых чисел;

$s$  — номер статьи ведомственного перечня документов со сроками их хранения, к которому отнесен документ;  $s \in \{S\}$ , где  $S$  — множество статей ведомственного перечня документов со сроками их хранения;

$H$  — отметка об уничтожении электронного дела;

$\zeta$  — наименование структурного подразделения (должностного лица) к чьей информационной области деятельности относится электронное дело,  $\zeta \in \{\zeta^i\}$ , где  $\zeta^i$  — множество наименований структурных подразделений (должностных лиц) в штатном расписании воинской части (организации).

Основываясь на формуле (1), задача формирования электронных дел СЭД сводится к определению значений элементов кортежа, описывающих электронное дело. Для решения поставленной задачи используется математиче-

ский аппарат логики предикатов, которая позволяет создавать общие модели [8, 9].

Исходными данными для методики формирования электронных дел являются: исполненные ЭД; перечень возможных реквизитов, которые могут быть нанесены на ЭД; перечень возможных видов формализованных ЭД; перечень областей информационной ответственности; эталонный вектор признаков формализованного ЭД для каждой области информационной ответственности; перечень должностных лиц (структурных подразделений) организации; список значимых слов; список статей ведомственного Перечня документов со сроками их хранения; модели видов ЭД; модели реквизитов модели статей ведомственного Перечня документов со сроками их хранения; модели контуров СЭД; модели сроков хранения ЭД; модели электронных дел, построенные с использованием данных, содержащихся в базе данных реквизитов документов и ключевых слов в них (свидетельство о государственной регистрации базы данных от 28.11.2019 г № 2019622203).

Допущениями в методике формирования электронных дел являются:

1. В СЭД поступают юридически значимые, оформленные в соответствии с требованиями нормативных правовых актов по делопроизводству, формализованные ЭД;

2. Создана база данных, которая содержит значимые слова, которые могут содержаться в реквизитах ЭД, перечень реквизитов, видов ЭД;

3. Модели электронных дел, состоящие из наименования электронных дел, включаемых в номенклатуру электронных дел организации, соотношенные с наименованиями структурных подразделений и статьями ведомственного перечня документов, со сроками их хранения, будут созданы на этапе создания электронной номенклатуры дел организации и занесены в базу данных;

4. Создана база данных, которая содержит статьи ведомственного перечня документов со сроками их хранения;

5. Создана база данных, которая содержит модели реквизитов, видов документов, эталонные вектора признаков формализованного ЭД для каждой области информационной ответственности, модели статей Перечня документов со сроками их хранения, модели контуров СЭД, модели сроков хранения ЭД, модели электронных дел;

6. Ранжирование значимых слов относительно контекста документа осуществляется способом, описанным в [10].

Решение поставленной задачи декомпозируются на восемь этапов.

На первом этапе выявляют реквизиты, нанесенные на ЭД.

Каждый реквизит формализованного документа описывается характеристиками текста ( $t$ ): местоположе-

нием реквизита на стандартном листе, местоположением в строке, начертанием текста, размером кегля текста и уникальным значимым словом в реквизите, отличающим его от реквизита, имеющего такие же характеристики текста. Характеристика текста местоположение реквизита на стандартном листе может принимать значения: текст расположен вверху, посередине, в нижней части. Характеристика текста местоположение в строке может принимать значения: текст выровнен по левому краю, по правому краю, по середине или по ширине. Характеристика текста начертание текста может принимать значения: текст начертан обычным, жирным, курсивом, подчеркнутым шрифтом. Примеры соотношений характеристик текста и значимых слов, позволяющих определить реквизит, представлены в табл. 1 [11], и позволяют построить модели реквизитов. Используя логику предикатов, модели реквизитов можно записать в виде формул, например, модель реквизита «Согласование» будет иметь следующий вид (2):

$$i(20) \leftrightarrow (t(1,1) \vee t(1,3)) \wedge (t(2,1) \vee t(2,2) \vee t(2,3)) \wedge t(3,1) \wedge t(4,2) \wedge b(2), \quad (2)$$

где  $i(20)$  — реквизит «Согласование»;

$t(1,1)$  — реквизит расположен в верхней части стандартного листа;

$t(1,3)$  — реквизит расположен в нижней части стандартного листа;

$t(2,1)$  — реквизит выровнен по левому краю;

$t(2,2)$  — реквизит выровнен по правому краю;

$t(2,3)$  — реквизит выровнен по ширине;

$t(3,1)$  — реквизит начертан обычным шрифтом;

$t(4,2)$  — реквизит начертан кеглем от 11 до 14;

$b(2)$  — значимое слово «Согласовано».

Математическую модель, формализующую интеллектуальную деятельность по выявлению реквизитов, нанесенных на ЭД, можно представить в виде предиката узнавания реквизитов, нанесенных на ЭД, который примет значение «истина» (выявит реквизит) при условии, что на документе существуют реквизиты, которые описываются характеристиками текста (под характеристиками текста понимается положение на стандартном листе (вверху, посередине, внизу), положение в строке (центрирование текста по ширине, по правому или левому краю), вид шрифта (обычный, курсив, зачеркнутый, подчеркнутый), размер шрифта), и значимыми словами в реквизитах, соответствуют модели проверяемого реквизита, и будет иметь вид (3):

$$\forall i \exists b \exists \alpha \exists h \exists I ((P_i(h, \alpha) \wedge P_b(b)) \leftrightarrow I), \quad (3)$$

где  $i$  — реквизит, нанесенный на документ;

$b = \{1, \dots, b'\}$  — множество значимых слов в конкретном реквизите,  $b'$  — конечное значение во множестве значимых слов для конкретного реквизита;

$h = \{1, \dots, m\}$  — множество характеристик текста,  $m$  — конечное значение во множестве возможных характеристик текста;

$\alpha = \{1, \dots, n\}$  — множество переменных характеристик текста,  $n$  — конечное значение в множестве переменных характеристик текста;

$I$  — модель реквизита, для которого проверяется выполнение условий, например реквизит «Согласование», имеет вид формулы (2);

$P_b(b)$  — предикат узнавания значимых слов в реквизите;

$P_i(h, \alpha)$  — предикат узнавания  $\alpha$ -ой переменной  $h$ -ой характеристики текста.

На втором этапе определяется вид формализованного ЭД. Каждый вид формализованного ЭД характеризуется множеством реквизитов, нанесенных на ЭД и уникальными значимыми словами в реквизитах, присущих каждому виду формализованного ЭД. В табл. 3 [11] приведены примеры соотношения между реквизитами и уникальными значимыми словами, которые позволяют построить модели видов формализованного ЭД, и записать их, используя логику предикатов. Например, модель вида формализованного документа «протокол» будет иметь вид формулы (4):

$$j(20) \leftrightarrow i(28) \wedge \overline{i(16)} \wedge \overline{i(2)} \wedge \overline{i(3)} \wedge \overline{i(4)} \wedge \overline{i(6)} \wedge \overline{i(13)} \wedge \overline{i(20)} \wedge \overline{i(14)} \wedge b(16), \quad (4)$$

где  $j(20)$  — модель вида формализованного документа «протокол»

$i(28)$  — реквизит «подпись»;

$\overline{i(16)}$  — реквизит «заголовок к тексту»;

$\overline{i(2)}$  — отсутствует реквизит «эмблема Российской Федерации»;

$\overline{i(3)}$  — отсутствует реквизит «наименование федерального органа власти»;

$\overline{i(4)}$  — отсутствует реквизит «наименование воинской части»;

$\overline{i(6)}$  — отсутствует реквизит «справочные данные»;

$\overline{i(13)}$  — отсутствует реквизит «адресат»;

$\overline{i(20)}$  — отсутствует реквизит «гриф согласования документа»;

$\overline{i(14)}$  — отсутствует реквизит «гриф утверждения документа»;

$b(16)$  — значимое слово «Протокол».

Математическую модель, которая формализует интеллектуальную деятельность по определению вида формализованного ЭД, можно представить в виде предиката узнавания вида формализованного ЭД, который примет



значение «истина» (будет принято решение об определении вида формализованного ЭД) при условии, что на документ нанесены реквизиты, соответствующие виду формализованного документа, и в них содержатся уникальные значимые слова, которые характерны для проверяемого вида формализованного документа, и будет иметь вид формулы (5):

$$\forall j \exists i \exists b \exists J ((P_i(t, b) \wedge P_b(b)) \leftrightarrow J), \quad (5)$$

где  $j$  — вид формализованного ЭД;

$i = \{1, \dots, k\}$  — множество возможных реквизитов, присущих конкретному виду формализованного документа,  $k$  — конечное значение множества возможных реквизитов, присущих конкретному виду формализованного документа;

$b = \{1, \dots, b\}$  — множество значимых слов в конкретном реквизите для конкретного вида формализованного документа,  $b$  — конечное значение множества значимых слов для конкретного реквизита;

$P_i(t, b)$  — предикат узнавания реквизитов, определяемых по формуле (3);

$P_b(b)$  — предикат узнавания уникального значения  $b$  значимого слова в реквизите конкретного вида формализованного документа;

$J$  — модель вида документа, например, для вида документа «Протокол», имеет вид формулы (4).

На третьем этапе определяется область деятельности организации (информационной ответственности), к которой относится исполненный ЭД. Для этого производится предварительная обработка текста, вычисляются веса значимых слов, определяются вектора признаков области информационной ответственности способом, предложенным в [10]. При этом каждая область информационной ответственности должностного лица (структурного подразделения) характеризуется вектором признаков, который заранее определен.

Математическая модель, формализующая интеллектуальную деятельность по определению области информационной ответственности, к которой относится формализованный ЭД, может быть представлена в виде предиката узнавания области информационной ответственности, который примет значение «истина» (будет принято решение об отнесении формализованного ЭД к области информационной ответственности ( $\beta$ )) в случае соответствия полученного вектора признаков для конкретного документа и вектора признаков документов, относящихся к области информационной ответственности, и записана в виде формулы (6).

$$\forall \beta \exists f_d^{\omega_p} \exists f_{\beta_l}^{\omega_p} ((f_d^{\omega_p} \leftrightarrow f_{\beta_l}^{\omega_p}) \rightarrow \beta_l), \quad (6)$$

где  $\beta$  — области информационной ответственности,  $\beta \in \{1, \beta'\}$ , где  $\beta'$  — конечное значение в множестве возможных областей информационной ответственности;

$f_d^{\omega_p}$  — вектор признаков формализованного ЭД;

$f_{\beta_l}^{\omega_p}$  — эталонный вектор признаков формализованно-

го ЭД для  $\beta_l$ -ой области информационной ответственности;

$\beta_l$  —  $l$ -я область информационной ответственности, где  $l \in \{1, \dots, l'\}$  — множество значений области информационной ответственности,  $l'$  — конечное значение в множестве области информационной ответственности.

На четвертом этапе, используются полученные значения области информационной ответственности; заранее определенное множество информационных областей ответственности для каждого должностного лица (структурного подразделения), предназначенное для определения должностного лица (структурного подразделения организации (учреждения)) ( $\zeta$ ), к компетенции которого относится исполненный формализованный ЭД. Математическую модель формализующую интеллектуальную деятельность по узнаванию должностного лица (структурного подразделения) можно представить в виде предиката узнавания должностного лица (структурного подразделения), к области информационной ответственности которого относится исполненный ЭД. Предикат примет значение «истина» (определит должностное лицо (структурное подразделение)) при условии, что определенная в формуле (6), область информационной ответственности ( $\beta$ ), входит в множество областей информационной ответственности конкретного должностного лица (структурного подразделения). Предикат узнавания должностного лица (структурного подразделения) представлен формулой (7):

$$\forall \zeta \exists \beta \exists \beta^\zeta ((\beta \wedge \beta^\zeta) \rightarrow \zeta_u), \quad (7)$$

где  $\zeta$  — должностное лицо (структурное подразделение);

$\beta$  — значение области информационной ответственности, к которой относится документ,  $\beta \in \{1, \beta'\}$ , где  $\beta'$  — конечное значение множества возможных областей информационной ответственности;

$\beta^\zeta$  — множество областей информационной ответственности относящихся к деятельности должностного лица (структурного подразделения),  $\beta^\zeta \in \{1, \beta'^\zeta\}$ , где  $\beta'^\zeta$  — конечное значение в множестве возможных областей информационной ответственности должностного лица (структурного подразделения);

$\zeta_u$  — должностное лицо (структурное подразделение) к чьей области информационной ответственности относится ЭД,  $\zeta_u \in \{1, u'\}$ , где  $u'$  — конечное значение в множестве возможных должностных лиц (структурных подразделений).

На пятом этапе определяется статья ведомственного перечня со сроками их хранения, ( $s$ ) (далее — Перечень...) к которой может быть отнесен исполненный формализованный ЭД. При анализе Перечня... были определены соотношение области информационной ответственности и вида формализованного документа, позволяющее определить статью Перечня..., к которой может быть отнесен исполненный формализованный ЭД. Примеры вышеуказанных соотношений представлены в табл. 1).

Данные из таб. 1 позволяют построить математические модели статей Перечня..., например статьи 18 Перечня..., и записать ее, используя логику предикатов в виде следующей формулы (8):

$$\beta(1) \wedge j(2) \leftrightarrow s(18) \quad (8)$$

где  $\beta(1)$  — значение области информационной ответственности — «оперативные вопросы»;

$i(2)$  — значение вида формализованного документа — «постановление»;

$s(18)$  — статьи 18 Перечня...

Математическую модель, формализующую интеллектуальную деятельность по определению статьи Перечня..., можно представить в виде предиката узнавания статьи Перечня..., который примет значение «истина» (определит статью Перечня...) в случае совпадения моде-

ли статьи Перечня... с полученным для ЭД значениям вида формализованного ЭД, по формуле (5) и области информационной ответственности, полученной по формуле (6), и выразится формулой (9):

$$\forall s \exists \beta \exists j \exists \Lambda ((\beta \wedge j) \leftrightarrow \Lambda), \quad (9)$$

где  $s$  — статья Перечня...;

$\beta$  — область информационной ответственности;

$j$  — вид формализованного ЭД;

$\Lambda$  — модель статьи Перечня..., например статьи 18, представленной в формуле (8).

На шестом этапе определяется контур СЭД, в котором был разработан и хранится ЭД ( $\gamma$ ).

Под внешним контуром СЭД понимается, совокупность автоматизированных рабочих мест СЭД, на которых был разработан ЭД организации, находящейся на отличном иерархическом уровне ФОИВ. Для определения контура СЭД, в котором был разработан и хранится ЭД, производят интеллектуальный анализ наличия и содержания реквизитов (наличие этих реквизитов на ЭД определено на этапе 1): место составления, адресат, отметка о поступлении и значимых слов в них, которые характеризуют контур СЭД, и устанавливают соответствие ЭД контуру СЭД.

В табл. 2 представлены примеры соответствия конечного множества реквизитов и значимых слов в них контуру СЭД.

Таблица 1

Примеры соотнесения вида формализованного документа и области информационной ответственности для выявления статьи Перечня...

| Область информационной ответственности ( $\beta$ )          | Вид формализованного документа ( $j$ ) |                         |                  |                    |                        |
|---|--|-------------------------|------------------|--------------------|------------------------|
|   | Поручение ( $j_1$ )                    | Постановление ( $j_2$ ) | Приказ ( $j_3$ ) | Указание ( $j_4$ ) | Распоряжение ( $j_5$ ) |
| Оперативные вопросы ( $\beta_1$ )                           | статья 5                               | статья 18               |                  |                    |                        |
| По основной деятельности ( $\beta_2$ )                      |  |                         | статья 19(а)     |                    | статья 19(а)           |
| По личному составу ( $\beta_3$ )                            |  | статья 739              | статья 19(б)     |                    | статья 19(б)           |
| Сертификация и освидетельствование ( $\beta_4$ )            |  | статья 186              |                  |                    |                        |
| Недвижимость ( $\beta_5$ )                                  |  | статья 46               |                  |                    |                        |
| Взаимодействие с международными организациями ( $\beta_6$ ) |  |                         |                  | статья 484         |                        |
| Культурно-массовые мероприятия ( $\beta_7$ )                |  | статья 962              |                  |                    |                        |

Таблица 2

Примеры соответствия реквизитов и значимых слов в них контуру СЭД

| Значимые слова  | Внешний контур СЭД                            |                                    |                 | Внутренний контур СЭД                         |                                    |                 |
|---|---|------------------------------------|-----------------|---|------------------------------------|-----------------|
|   | место составления (издания) документа (i(13)) | гриф утверждения документа (i(16)) | подпись (i(22)) | место составления (издания) документа (i(13)) | гриф утверждения документа (i(16)) | подпись (i(22)) |
| Командир войсковой части № 0000 (b <sup>1</sup> )               | 0   | 0                                  | 0               | 0   | 1                                  | 1               |
| Начальник штаба воинской части № 0000 (b <sup>2</sup> )         | 0   | 0                                  | 0               | 0   | 1                                  | 1               |
| Руководитель Федерального архивного агентства (b <sup>3</sup> ) | 0   | 1                                  | 1               | 0   | 0                                  | 0               |
| г. Краснодар (b <sup>4</sup> )                                  | 0   | 0                                  | 0               | 1   | 0                                  | 0               |
| г. Москва (b <sup>5</sup> )                                     | 1   | 0                                  | 0               | 0   | 0                                  | 0               |

Приведенные в табл. 2 соотношения позволяют построить примеры математических моделей контуров СЭД для приведенных данных, и представить их в виде формул (10):

$$\begin{aligned}
 & (i(16) \wedge b_3 \wedge \bar{b}_1 \wedge \bar{b}_2) \wedge (i(13) \wedge b_5 \wedge \bar{b}_4) \wedge \\
 & \wedge (i(22) \wedge b_5 \wedge \bar{b}_1 \wedge \bar{b}_2) \leftrightarrow \gamma_{vn}, \\
 & (i(16) \wedge ((b^1 \vee b^2) \wedge \bar{b}^3)) \wedge (i(22) \wedge ((b^1 \vee b^2) \wedge \bar{b}^3)) \wedge \\
 & \wedge (i(13) \wedge b^4 \wedge \bar{b}^5) \leftrightarrow \gamma_{vnk},
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

где  $b = \{1, \dots, b^i\}$  — множество значимых слов в конкретном реквизите,  $b^i$  — конечное значение во множестве значимых слов для конкретного реквизита;

- $i(13)$  — реквизит ЭД «место составления (издания) документа»;
- $i(16)$  — реквизит ЭД «гриф утверждения документа»;
- $i(27)$  — реквизит ЭД «подпись»;
- $\gamma_{vn}$  — модель внешнего контура СЭД;
- $\gamma_{vnk}$  — модель внешнего контура СЭД.

Математическую модель, формализующую интеллектуальную деятельность по определению контура СЭД можно представить в виде предиката узнавания контура

СЭД, в котором был разработан ЭД, который примет значение «истина» (будет определен контур СЭД) при условии совпадения модели контура СЭД, представленной формулой (10), и наличии уникальных значимых слов в реквизитах, выявленных по формуле (3), место составления, адресат, отметка о поступлении и примет вид формулы (11):

$$\forall \gamma \exists b \exists i(13), \exists i(16), \exists i(27) ((i(13) \wedge b) \wedge (i(16) \wedge b) \wedge (i(27) \wedge b)) \leftrightarrow \gamma,
 \tag{11}$$

где  $\gamma$  — контур СЭД, в котором был разработан ЭД;

$b = \{1, \dots, b^i\}$  — множество значимых слов в конкретном реквизите,  $b^i$  — конечное значение во множестве значимых слов для конкретного реквизита;

- $i(13)$  — реквизит «место составления (издания) документа»;
- $i(16)$  — реквизит «гриф утверждения документа»;
- $i(27)$  — реквизит «подпись»;
- $\gamma$  — модель контура СЭД.

На седьмом этапе определяют срок хранения исполненного ЭД ( $t^d$ ).

В соответствии с требованиями Перечня..., срок хранения документа зависит не только от статьи Перечня..., но и от места (контура СЭД, внутреннего или внешне-

го для организации), где он был разработан и хранится. Примеры, показывающие соотношения между контуром, в котором был разработан ЭД и статьей Перечня..., к которой был отнесен ЭД по формуле (9), представлены в та-

блицах (табл. 3 и 4). Значение срока хранения ЭД можно получить, используя данные из Перечня... для построения соотношений, между статьей Перечня... и контуром СЭД, в котором он был разработан (табл. 5).

Таблица 3

Пример определения сроков хранения документов, хранящихся в организации, их разработавшей (внутренний контур)

| Область информационной ответственности   | Вид формализованного документа |                            |                              |                          |
|--|--------------------------------|----------------------------|------------------------------|--------------------------|
|  | Утвержденные лимиты            | Постановление              | Аналитические записки        | Регламент                |
| Муниципальные услуги                     |                                |                            |                              | статья 54 срок хр. пост. |
| Муниципальные нормативные правовые акты  |                                | статья 1<br>срок хр. пост. |                              |                          |
| Государственные и муниципальные служащие |                                |                            |                              | статья 80 срок хр. пост. |
| Выполнение планов организации            |                                |                            | статья 294<br>срок хр. пост. |                          |
| Заработная плата                         | статья 363<br>срок хр. пост.   |                            |                              |                          |

Таблица 4

Пример определения сроков хранения документов, хранящихся в организации их не разрабатывавшей (внешний контур)

| Область информационной ответственности   | Вид формализованного документа                    |   |                              |                           |
|--|---|---|------------------------------|---------------------------|
|  | Утвержденные лимиты                               | Постановление                                   | Аналитические записки        | Регламент                 |
| Муниципальные услуги                     |   |   |                              | статья 54 срок хр. 3 года |
| Муниципальные нормативные правовые акты  |   | статья 1<br>срок хр. до минования<br>надобности |                              |                           |
| Государственные и муниципальные служащие |   |   |                              | статья 80 срок хр. 3 года |
| Выполнение планов организации            |   |   | статья 294<br>срок хр. 5 лет |                           |
| Заработной платы                         | статья 363<br>срок хр. до минования<br>надобности |   |                              |                           |

Таблица 5

Сроки хранения документов в зависимости от статьи Перечня и контура СЭД, в которых он был разработан

| Статья Перечня документов со сроками хранения | Срок хранения документов    |                          |
|---|-----------------------------|--------------------------|
|   | Для внутреннего контура СЭД | Для внешнего контура СЭД |
| 1617  | 10 лет                      | 5 лет                    |
| 772   | 10 лет                      | 5 лет                    |





Представленные в табл. 5 для примера данные позволяют построить математические модели срока хранения документа, например, срока хранения 10 лет, и выразить формулой (12):

$$s(1617) \wedge \gamma_{vn} \vee s(772) \wedge \gamma_{vn} \leftrightarrow t^d (10), \quad (12)$$

где  $s(772)$ ,  $s(1617)$  — статьи Перечня № 772 и № 1617;

$\gamma_{vn}$  — внутренний контур;

$t^d(10)$  — срок хранения документов 10 лет.

Математическую модель, формализующую интеллектуальную деятельность по определению сроков хранения ЭД, можно представить в виде предиката узнавания срока хранения ЭД, который примет значение «истина» (определит срок хранения ЭД) при условии соответствия модели срока хранения ЭД, определяемого по формуле (12) и статьи Перечня..., к которой был отнесен исполнений ЭД, определенной по формуле (9) и контура СЭД в котором был разработан документ, определенного в (11) и выразить формулой (13):

$$\forall t^d \exists s \exists \gamma \exists \tau ((s \wedge \gamma) \leftrightarrow \tau), \quad (13)$$

где  $t^d$  — срок хранения ЭД;

$s$  — статья Перечня...;

$\gamma$  — контур СЭД, в котором разработан и хранится исполненный ЭД;

$\tau$  — модель срока хранения ЭД, например срока хранения ЭД 10 лет представлен в формуле (12).

На восьмом этапе определяют электронное дело, в которое будет распределен исполненный ЭД.

Математическую модель, формализующую интеллектуальную деятельность по определению электронного дела ( $\emptyset$ ), в которое будет распределен исполненный ЭД, можно представить в виде предиката узнавания электронного дела, в которое будет распределен исполненный электронный документ, который примет значения «истина» (определит электронное дело) в случае соответствия модели электронного дела (формируется на этапе составления номенклатуры электронных дел (1)) статье Перечня..., полученной по формуле (13), сроку хранения документа, полученному по формуле (11) и, отнесения к области деятельности конкретного должностного лица (структурного подразделения) полученного по формуле (7) и выразится следующей формулой (14):

$$\forall \Delta \exists s \exists t^d \exists \zeta \exists \Theta ((s \wedge t^d \wedge \zeta) \leftrightarrow \Theta), \quad (14)$$

где  $\Delta$  — электронное дело, в котором будет храниться исполненный ЭД;

$s$  — статья Перечня, к которой отнесен ЭД;

$t^d$  — срок хранения ЭД;

$\zeta$  — должностное лицо (структурное подразделение) к области информационной ответственности которого отнесен ЭД;

$\Theta$  — модель электронного дела, будет построена при составлении электронной номенклатуры дел организации.

Вопрос учета меток конфиденциальности исполненного ЭД и электронного дела (соответствия степени конфиденциальности ЭД и степени конфиденциальности электронного дела, в которое он распределяется) при формировании электронных дел, оставлен за рамками настоящей статьи.

### Заключение

Представленная в работе методика формирования электронных дел в СЭД, позволяет снизить трудозатраты должностных лиц на формирование электронных дел в СЭД, и, тем самым повысить оперативность обработки информации. Методика формирования электронных дел СЭД отличается от существующих тем, что позволяет выполнять процесс формирования электронных дел автоматически. Методика основана на формализации интеллектуальной деятельности должностных лиц и использовании разработанных моделей реквизитов формализованных документов, видов формализованных документов, областей информационной ответственности, к которой относится документ, статей Перечня..., контуров СЭД, в котором ЭД был разработан и хранится, сроков хранения документов, электронных дел. Методика может быть использована как при модернизации существующих СЭД путем разработки отдельных программных модулей, так и при проектировании перспективных СЭД.

### Литература

1. Галактионова Ю. С., Курбацкая В. Н., Рогова И. О. Развитие систем электронного документооборота в России // Современные тенденции в экономике и управлении: новый взгляд. 2015. № 37–2. С. 165–169.
2. Обзор российского рынка СЭД // Tadviser. Государство. Бизнес. IT. URL: <http://www.tadviser.ru/index.php/СЭД> (дата обращения: 23.10.2019).
3. Alfonso C. M., Schwarz A., Roldán J.L., Sánchez-Franco M.J. EDMS Use in Local E-Government: An Analysis of the Path from Extent of Use to Overall Performance // International Journal of Electronic Government Research. 2015. No. 11(2). Pp. 18–34. URL: [https://www.researchgate.net/publication/279156704\\_EDMS\\_Use\\_in\\_Local\\_E-Government\\_An\\_Analysis\\_of\\_the\\_Path\\_from\\_Extent\\_of\\_Use\\_to\\_Overall\\_Performance](https://www.researchgate.net/publication/279156704_EDMS_Use_in_Local_E-Government_An_Analysis_of_the_Path_from_Extent_of_Use_to_Overall_Performance) (дата обращения: 23.10.2019).
4. Сведения о результатах исследования внедренных систем электронного документооборота в федеральных органах исполнительной власти. 2013. URL: <https://digital.gov.ru/ru/documents/3837/> (дата обращения 20.10.2019).

5. *Королев И.Д., Мезенцев А.С., Махнев А.П., Онуфриев К.Н.* Анализ систем электронного документооборота по распределению электронных документов в дела // Сборник статей по материалам III-IV международной научно-практической конференции «Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований». Новосибирск: Сибирская академическая книга, 2018. С. 6–11.

6. *Бондаренко М.Ф., Шабанов-Кушнарченко Ю.П.* Нормальные формы формул алгебры конечных предикатов // Бионика интеллекта. 2011. № 3(77). С. 14-29.

7. *Ожерельева Т.А.* Логические приемы и методы, применяемые при извлечении знаний // ИТНОУ. 2018. № 6. С. 69–77. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/logicheskie-priemy-i-metody-primenyaemye-pri-izvlechenii-znaniy/viewer> (дата обращения 01.04.2019).

8. *Вагин В.Н., Зарецкий Д.С.* Использование логики предикатов первого порядка в системах поддержки истинности на основе предположений // Программные продукты и системы. 2013. № 4. С. 127–133.

9. *Вагин В.Н., Зарецкий Д.С.* Решение задач диагностики с использованием систем поддержки истинности // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. № 12 (113). С. 63–71.

10. Патент 2254610 РФ. Способ автоматической классификации документов / Аграновский А.В., Арутюнян Р.Э., Хади Р.А., Телеснин Б.А.; Заявл. 04.09.03; Опубл. 20.06.05. Бюл. № 7. 9 с.

11. *Королев И.Д., Носенко С.В.* Подходы к оперативной идентификации формализованных электронных документов в автоматизированных делопроизводствах // Научный журнал КубГАУ. 2013. № 92(08). URL: <http://ej.kubagro.ru/2013/08/pdf/74.pdf> (дата обращения 10.04.2019).

---

## MODEL OF THE DIGITAL CASE FORMATION OF ELECTRONIC DOCUMENT MANAGEMENT SYSTEM

### **IGOR D. KOROLEV,**

Krasnodar, Russia, pi\_korolev@mail.ru

### **VADIM S. NAZINTSEV,**

Krasnodar, Russia, lazo12@list.ru

### **ALEXANDER S. MEZENTSEV,**

Krasnodar, Russia, Russia, ravings13@inbox.ru

### **ALEXANDER P. MAKHNEV?**

Krasnodar, Russia, a23632@yandex.ru

**KEYWORDS:** formation model; electronic document management system; digital case; electronic document; automatic formation of digital case.

### **ABSTRACT**

The subject of the research is the process of forming electronic files of the electronic document management system. The purpose of the study was to identify the requirements of regulatory legal acts in the field of information technology development in the Russian Federation, office management and archival Affairs in Federal Executive authorities, in terms of the formation of electronic files, the current state of Affairs, in terms of the implementation of the process of forming electronic files in the software systems used by Federal Executive authorities and organizations that implement the functions of electronic document management, creation of a method for automatic formation of electronic files of the electronic document management system. In the course of the research, we analyzed normative legal acts in the field of information technology development in the Russian

Federation, office management and archival Affairs in Federal Executive bodies, the functionality of software complexes used in them that implement the functions of electronic document management, scientific articles that address the issues of automation of processes performed in the implementation of electronic document management functions. The mathematical apparatus of predicate logic was used in the construction of the method of automatic formation of electronic files of the electronic document management system. In the course of the research, the requirements of regulatory legal acts for the formation of electronic files when conducting office work in Federal Executive authorities, the shortcomings of the software systems used that implement the functions of electronic document management, the algorithm of actions performed in the formation



of electronic files, the method of automatic formation of electronic files in the electronic document management system. The developed method formalizes the intellectual activity of officials of the office division when performing the process of forming electronic files. The method can be used in the design of advanced electronic document management systems and the creation of separate software modules that implement the function of automatic formation of electronic files of electronic document management systems.

## REFERENCES

- Galaktionova Yu. S., Kurbatskaya V.N., Rogova I.O. Razvitie sistem elektronnoogo dokumentooborota v Rossii [Development of electronic document management systems in Russia]. *Sovremennye tendentsii v ekonomike i upravlenii: novyy vzglyad* [Modern trends in Economics and management: a new view]. 2015. № . 37-2. Pp. 165-169. (In Rus)
- Review of the Russian SED market. *Tadviser. Government. Business. IT*. URL: <http://www.tadviser.ru/index.php/СЭД> (date of access: 23.11.2019). (In Rus)
- Alfonso C.M., Schwarz A., Roldán J.L., Sánchez-Franco M.J. EDMS Use in Local E-Government: An Analysis of the Path from Extent of Use to Overall Performance. *International Journal of Electronic Government Research*. 2015. No. 11(2). Pp. 18-34. URL: [https://www.researchgate.net/publication/279156704\\_EDMS\\_Use\\_in\\_Local\\_E-Government\\_An\\_Analysis\\_of\\_the\\_Path\\_from\\_Extent\\_of\\_Use\\_to\\_Overall\\_Performance](https://www.researchgate.net/publication/279156704_EDMS_Use_in_Local_E-Government_An_Analysis_of_the_Path_from_Extent_of_Use_to_Overall_Performance) (date of access: 20.10.2019).
- Information about the results of the study of implemented electronic document management systems in Federal Executive authorities. 2013. URL: <https://digital.gov.ru/ru/documents/3837/> (date of access: 20.10.2019). (In Rus)
- Korolev I.D., Mezentssev A.S., Makhnev A.P., Onufriev K.N. Analiz sistem elektronnoogo dokumentooborota po raspredeleniyu elektronnykh dokumentov v dela [Analysis of electronic document management systems for the distribution of electronic documents in cases]. *Sbornik statey po materialam III-IV mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Voprosy tekhnicheskikh i fiziko-matematicheskikh nauk v svete sovremennykh issledovaniy"* [Proc. of articles on the materials of the III-IV international scientific and practical conference "Questions of technical and physical and mathematical Sciences in the light of modern research"]. Novosibirsk: Sibirskaya akademicheskaya kniga, 2018. Pp. 6-11. (In Rus)
- Bondarenko M.F., Shabanov-Kushnarenko Yu.P. PDNF in final predicates algebra. *Bionics of Intelligense: Sci. Mag.* 2011. № 3(77). Pp. 14-29. (In Rus)
- Ozhereleva T.A. Logical techniques and methods used in the extraction of knowledge. *ITNOU*. 2018. № 6. C. 69-77. URL knowledge: <https://cyberleninka.ru/article/n/logicheskie-priemy-i-metody-primenyaemye-pri-izvlechenii-znaniy/viewer> (date of access: 01.04.2019). (In Rus)
- Vagin V.N., Zaretsky D.S. Application of first-order logic in assumption-based truth maintenance systems. *Software & Systems*. 2013. № 4. C. 127-133. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-logiki-predikatov-pervogo-poryadka-v-sistemah-podderzhki-istinnosti-na-osnove-predpolozheniy/viewer> (date of access: 01.04.2019). (In Rus)
- Vagin V.N., Zaretsky D.S. Truth maintenance systems in diagnostics problems. *Izvestiya SFedU. Engineering sciences*. 2010. No. 12 (113). Pp. 63-71. (In Rus)
- Patent 2254610 RF. Method for automated classification of documents / Agranovsky A.V., Harutyunyan R.E., Hadi R.A., Telesnin B.A.; Declared 04.09.03; Published 20.06.05. Bul. No. 7. 9 p. (In Rus)
- Korolyov I.D., Nosenko S.V. Approaches to the rapid identification of formalized electronic documents in automated records management. *Scientific Journal of KubSAU*. 2013. No. 92(08). URL: <http://ej.kubagro.ru/2013/08/pdf/74.pdf> (date of access: 10.04.2019). (In Rus)

## INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Korolev I. D., PhD, Full Professor, Professor of the Department of Information Security with Special Methods and Means, Krasnodar Higher Military School;

Nazintsev V. S., Postgraduate at the Department of Information Security with Special Methods and Means of the Krasnodar Higher Military School named after Army General S.M. Shtemenko;

Mezentssev A. S., Postgraduate at the Department of Information Security with Special Methods and Means of the Krasnodar Higher Military School named after Army General S.M. Shtemenko

Makhnev A. P., cadet of the Krasnodar Higher Military School named after Army General S.M. Shtemenko.



doi: 10.36724/2409-5419-2020-12-4-76-84

## ПРИМЕНЕНИЕ BIG DATA ПРИ АНАЛИЗЕ БОЛЬШИХ ДАННЫХ В КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЯХ

**ОРЛОВ  
Григорий Александрович<sup>1</sup>**

**КРАСОВ  
Андрей Владимирович<sup>2</sup>**

**ГЕЛЬФАНД  
Артем Максимович<sup>3</sup>**

### АННОТАЦИЯ

Понятие Big Data включает в себе совокупность всех наборов данных, общий размер которых в разы превосходит возможности работы обычных баз данных, так же требуется отметить применение неклассических методов обработки данных. К примеру, в управлении, анализе полученной информации или же просто хранении. Алгоритмы работы Big Data в наши дни смогли возникнуть параллельно с внедрением первых, в своем роде серверов с высокой производительностью, к примеру, мэйнфреймов, которые имеют достаточные ресурсы, требуемые с целью оперативной обработки информации, а также соответствующих компьютерным вычислениям с последующим анализом. Алгоритмы основаны на выполнении последовательно-параллельных вычислений, что значительно увеличивает скорость выполнения различных задач. В Big Data заинтересованы предприниматели и ученые, которых заботят вопросы, касающиеся не только качественной, но и актуальной интерпретации данных, а также создание инновационных инструментов для работы с ними. Гигантское количество данных обрабатывается для того, чтобы конечный пользователь получил нужные ему результаты для их дальнейшего эффективного использования. Big Data дает возможность компаниям расширить количество своих клиентов, привлекать новую целевую аудиторию, а тем же помогает реализовывать проекты, которые будут пользоваться спросом не только у текущих клиентов, но и привлекать новых. Решению данных проблем и соответствует активное внедрение, а также последующее использование Big Data. В работе рассмотрено сравнение основных типов баз данных и проведен анализ обнаружения вторжений на примере технологий распределенной информационной системы по обработке Big Data. Своевременное обнаружение вторжений в системы обработки данных необходимы для принятия мер по сохранению конфиденциальности и целостности и данных, а также для грамотного исправления ошибок и совершенствованию защите системы обработки данных.

### Сведения об авторах:

<sup>1</sup> студент Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург, Россия, grigory.a.orlov@gmail.com

<sup>2</sup> к.т.н., доцент, преподаватель Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург, Россия, krasov@inbox.ru

<sup>3</sup> аспирант Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург, Россия, amgelfand@mail.ru

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** большие данные; внедрение; ресурсы; алгоритмы; компьютерные вычисления; интерпретация; производительность.

**Для цитирования:** Орлов Г. А., Красов А. В., Гельфанд А. М. Применение Big Data при анализе больших данных в компьютерных сетях // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2020. Т. 12. № 4. С. 76–84. doi: 10.36724/2409-5419-2020-12-4-76-84



### Введение

В настоящее время объем обрабатываемой информации в мире растет в геометрической прогрессии. С целью быстрого реагирования на какие-либо изменения рынка, получения конкурентоспособных преимуществ, а также абсолютного повышения эффективности производства требуется правильно и быстро получать, обрабатывать и, анализировать большое количество данных [1].

Для того, чтобы наиболее эффективно работать с такими объемами информации, разработчикам была поставлена задача модернизировать инструменты, применяемые для анализа больших данных. Именно так в начале 2000-х годов появилось понятие Big Data, которое в то время интересовало узкий круг специалистов.

В наши дни практически каждый человек, имеющий отношение к цифровым технологиям, от обычного пользователя в социальных сетях до лидирующих разработчиков, имеет представление о данном определении. Данное направление в развитии информационных технологий становится не только наиболее популярным, но также и стратегически важным в современном мире [2].

Данные технологии способны позволить современному человеку обрабатывать большой объем данных, сделать иерархическую систематизацию, а также выявить какие-либо закономерности там, где человеческий мозг не смог бы их определить. Направление Big Data открывает абсолютно новые возможности относительно использования данных.

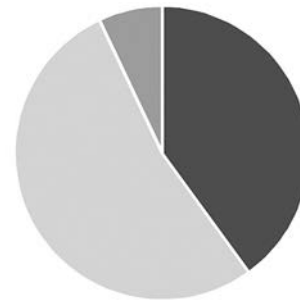
### Основная часть

Основываясь на небольшом исследовании традиционной базы данных в сравнении с технологиями Big Data, результаты структурированы в табл. 1.

Исходя из анализа таблицы, можно сделать вывод, что технологии Big Data являются наиболее эффективными и рациональными в работе по сравнению с традиционными базами данных.

Понятие Big Data включает в себя не только огромные пласты памяти, но также и сотни гигабайтов, и даже петабайтов данных, которые возможно обработать, проанализировать, а в дальнейшем извлечь из них необходимую информацию. Если обобщить все вышесказанное, то можно определить Big Data как набор технологий, предназначенных для получения информации [3, 4].

Также важно подчеркнуть, что объем данных, обрабатываемых через Big Data, непрерывно растет, растет параллельно со скоростью их обработки. Совершенствование этой области знаний в сфере информационных технологий полностью соответствует миру в наши дни, который стремительно развивается и накапливает огромное количество инновационных знаний (рис. 1).



■ Операционная эффективность ■ Клиентский сервис ■ Риск-менеджмент

Рис. 1. Сфера использования технологий Big Data

На текущий момент, Big Data удел не только гигантов IT мира. Благодаря таким решениям как Hadoop от ApacheSoftwareFoundation, набору облачных сервисов от IBM, Amazon, Google, это направление, становится доступным практически любым компаниям, работающим в сфере IT. А такие решения как Clickhouse, Cassandra, InfluxDB позволяют войти в сферу работы с Big Data даже отдельным персонам.

Таблица 1

Характерные особенности традиционной базы данных и Big Data

| Характеристика                     | Традиционная БД   | Big Data   |
|------------------------------------|---|--|
| Информационный объем               | От гигабайта ( $10^9$ байт), до терабайта ( $10^{12}$ байт) | От петабайта ( $10^{15}$ байт), до эксабайта ( $10^{18}$ байт) |
| Структурированность данных         | Структурированы   | Полу-структурированы и не структурированы                      |
| Способ хранения                    | Централизованный  | Децентрализованный   |
| Взаимосвязь между данными          | Сильная   | Слабая   |
| Модель хранения и обработки данных | Вертикальная модель   | Горизонтальная модель  |

Как видно из диаграммы (см. рис. 1), технологии Big Data наиболее распространены в сфере тестирования эффективности операционных систем, далее находятся разработки, касающиеся определения риск-менеджмента и клиентского сервиса.

Внедрение Big Data в современном мире является обязательным условием для развития лидирующих компаний в сфере информационных технологий. Не имея полного анализа поведения своих клиентов и средств прогнозирования, опираясь исключительно на опыт или интуицию, практически невозможно оставаться конкурентоспособным в современном мире. Грамотно настроенная и эффективно работающая система Big Data имеет возможность в доли секунд проанализировать и воспроизвести требуемую информацию на основе результата работы миллиарда действий клиентов компании.

В бизнесе современного мира уже появилось понятие DataDrivenManagment, смысл которого заключается в управлении компанией на основе анализа данных. Подобные способы управления имеют достаточно эффективные показатели<sup>1</sup> [5, 6].

Facebook, Google, Мейл.ру, Яндекс уже длительное время основывают свою работу на данных способах управления с целью принятия решений. В современном мире Big Data смогло заинтересовать и традиционный бизнес, владельцы которых имеют потребность в инновационных инструментах с целью повышения эффективности процессов.

Основными принципами работы с Big Data являются:

- горизонтальная масштабируемость;
- отказоустойчивость;
- локальность данных.

Сфера использования технологии Big Data является достаточно обширной. К примеру, с помощью этой технологии пользователь способен узнать о предпочтении клиентов, эффективности каких-либо компаний или же провести полный анализ рисков бизнеса.

Также требуется отметить, что Big Data являются одними из самых быстроразвивающихся сфер в информационных технологиях. Опираясь на статистические данные, полный объем получаемых, а также хранимых данных увеличивается вдвое каждые 1–2 года.

Опираясь на вышеуказанную информацию, можно сделать вывод о том, что Big Data является уже устоявшейся сферой, несмотря на ее относительно молодой возраст по отношению к другим технологиям. Big Data смогла получить распространение практически во всех сферах

бизнеса, а также одну из самых важных ролей в развитии компаний.

Технологии Big Data, используемые для сбора и обработки Big Data, можно разделить на 3 группы:

- программное обеспечение;
- оборудование;
- сервисные услуги.

К наиболее распространенным подходам обработки данных (ПО) относятся:

MapReduce — модель распределения вычислений. Используется для параллельных вычислений над очень большими наборами данных (петабайты и более). В программном интерфейсе не данные передаются на обработку программе, а программа — данным. Таким образом запрос представляет собой отдельную программу. Принцип работы заключается в последовательной обработке данных двумя методами Map и Reduce. Map выбирает предварительные данные, Reduce агрегирует их [7].

SQL — язык структурированных запросов, позволяющий работать с базами данных. С помощью SQL можно создавать и модифицировать данные, а управлением массива данных занимается соответствующая система управления базами данных и др.

Наряду с множеством возможностей и более эффективной работы относительно традиционных баз данных, технологии Big Data имеют ряд проблем при внедрении их в организацию.

Ниже (рис. 2) представлен график, наглядно показывающий степень распространенности проблемы.

Подводя итоги, можно с уверенностью заявить о том, что современный мир нуждается в разработке и усовершенствовании

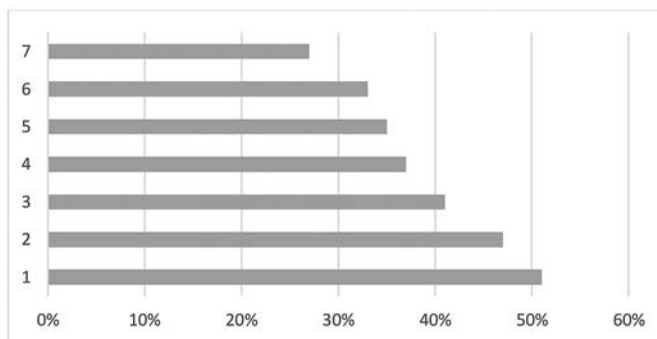


Рис. 2. Основные проблемы внедрения технологии Big Data:

- 1 — вопросы безопасности; 2 — Ограниченный бюджет организации; 3 — Нехватка персонала с целью внедрения данной технологии; 4 — Нехватка персонала для ведения проектов; 5 — Существующая сложность интеграции с существующими системами; 6 — Ограниченное число поставщиков данных; 7 — Предприятие не является готовым к технологиям Big Data

<sup>1</sup>Хабрхабр//BigData от А до Я. Часть 1: Принципы работы с большими данными, парадигма MapReduce/ сост.: А. Петров. URL: <https://habrahabr.ru/company/dca/blog/267361/> (дата обращения: 24.07.2019)



шенствовании сферы Big Data в области информационных технологий.

Эпоха Big Data уже наступила — объемы данных, генерируемых в науке, бизнесе, индустрии и управлении ИТ, растут экспоненциально. Однако существующие приложения обработки Big Data не позволяют контролировать этапы ввода данных, собирать статистику и подбирать оптимальные структуры для хранения индексов, оптимизировать размещение данных на диске для обеспечения высокой скорости ввода/вывода, для выполнения аналитических запросов нет возможности произвести глубокий статистический анализ и выработать оптимальный план выполнения.

Проведя анализ работы разных характеристик (табл. 2) можно сделать вывод, что даже в небольшой организации Защищенного контроля учета рабочего времени сотрудников (ЗКУ РВС) необходима для обработки различных видов связи структурных подразделений, для сохранности конфиденциальных персональных данных или же, например, финансовой отчетности. Понятие Big Data удачно сочетает в себе качества систем программного управления, систем адаптивного управления и систем интеллектуального управления [8, 9]. С алгоритмической точки зрения, комплекс программ модели разделяется на две части — собственно имитационную, которая при своем

функционировании имитирует процессы, протекающие по реальной распределенной информационной системе (РИС) (рис. 3), и сервисную, которая обеспечивает взаимодействие аппаратно-программного комплекса (АПК) или оператора с имитационной частью.

Подводя итоги табл. 2, Big Data необходимо выявить следующие основные моменты:

Проведем эксперимент в цифрах с целью сравнения основных характеристик SQL, NoSQL, BDA.

1. В начале научного эксперимента выявим основные и ключевые структурные различия SQL и NoSQL баз данных и внимательно рассмотрим их функциональные особенности.

2. NoSQL реляционная СУБД. Преимущества NoSQL:

2.1. NoSQL по сравнению с SQL, также крайне развитая СУБД;

Совместимость: NoSQL по сравнению с SQL в 5 раз доступней на всех основных платформах, включая Linux, Windows, Mac, BSD и Solaris. Также у неё есть библиотеки для языков вроде Node.js, Ruby, C#, C++, Java, Perl, Python и PHP;

Окупаемость: NoSQL по сравнению с SQL в 2 раза более окупаемо с открытым исходным кодом, находящаяся в свободном доступе.

Таблица 2

Таблица сравнения для Big Data

| Характеристики                                  | SQL                            | NoSQL                          | BDA                          | Аналитика больших данных (сравнительные характеристики)                                       |
|---|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------|---|
| Объектно-ориентированное программирование БД    | Да                             | Возможны разные варианты       | Нет                          | Практические схожие характеристики изучаемых языков программирования без существенных отличий |
| Мультимедийные типы данных                      | Да                             | Да                             | Не ограничено                | Практические схожие характеристики изучаемых языков программирования без существенных отличий |
| Макс размер таблиц                              | Да<br>указать размер<br>числом | Да<br>указать размер<br>числом | Практически<br>не ограничено | Практические схожие характеристики изучаемых языков программирования без существенных отличий |
| Макс число таблиц в БД                          | Не ограничено                  | Не ограничено                  | Не ограничено                | Есть отличия но незначительные  |
| Макс число таблиц на каждое соединение          | Не ограничено                  | Не ограничено                  | Не ограничено                | Есть отличия но незначительные  |
| Макс число пользователей БД                     | Не ограничено                  | Не ограничено                  | Не ограничено                | Есть отличия но незначительные  |
| Рекомендуемая емкость ОП на одного пользователя | Изменяемая<br>величина         | Изменяемая<br>величина         | Изменяемая<br>величина       | Есть отличия но незначительные  |

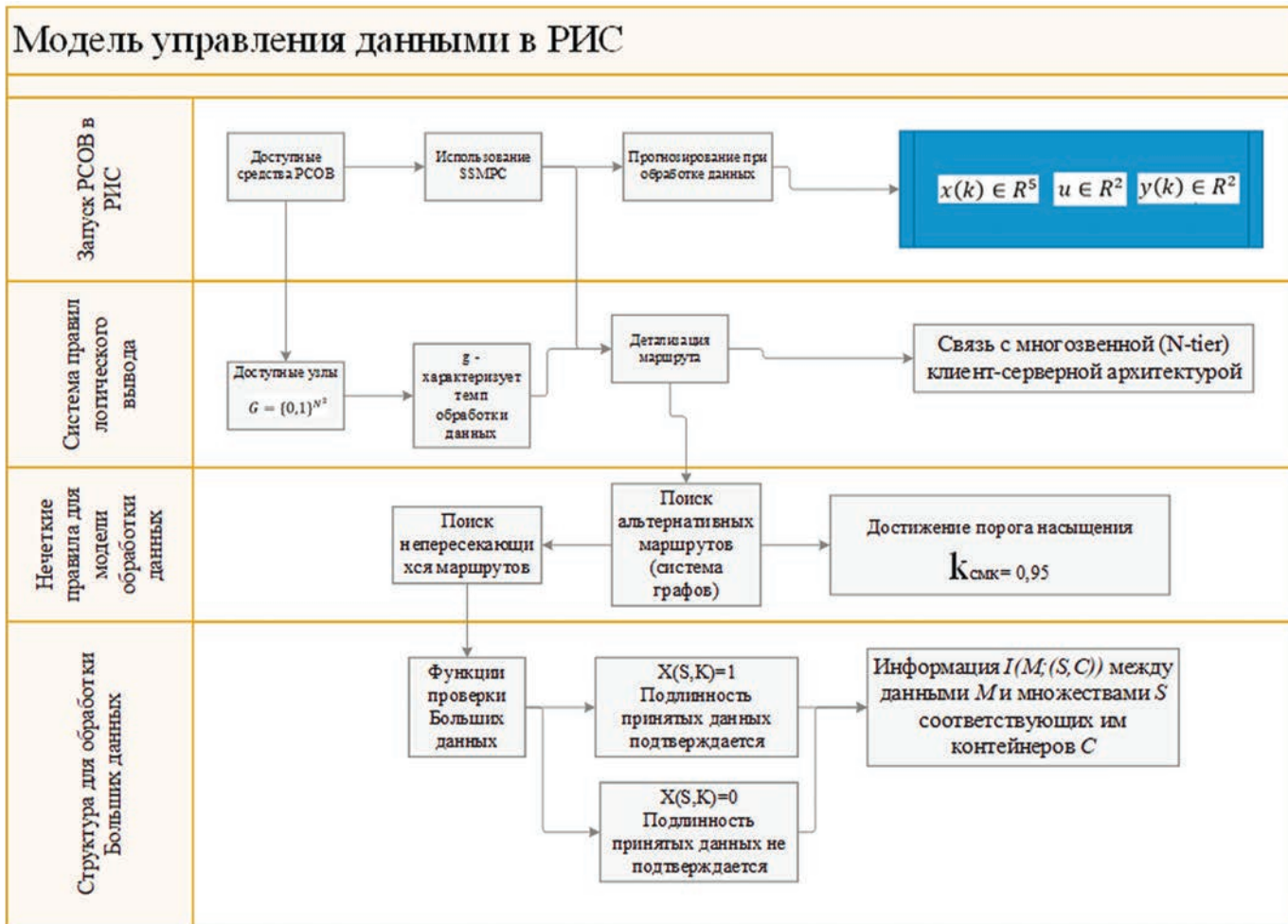


Рис. 3. Модель управления Big Data (с функциями запуска АПК, систем правил работы Больших данных в ИС)

Реплицируемость: Базу данных NoSQL, по сравнению с SQL, можно распределять между несколькими узлами, таким образом уменьшая нагрузку и улучшая масштабируемость и доступность приложения;

Шардинг: В то время как шардинг невозможен на большинстве SQL баз данных, NoSQL является исключением.

BDA: нереляционная СУБД.

#### Преимущества Big Data:

Динамическая схема: Как упоминалось выше, эта СУБД позволяет гибко работать со схемой данных без необходимости изменять сами данные;

Масштабируемость: BDA горизонтально масштабируема, что позволяет легко уменьшить нагрузку на сервера при больших объемах данных;

Собственно, сам АПК с Big Data — это комплекс, состоящий из аппаратного и программного обеспечения системы, позволяющий осуществлять сбор, обработку, хранение и отображение информации о состоянии объектов

в реальном масштабе времени. Здесь сервер тоже выступает в роли буфера между БД и запросами от других устройств. Все драйверы содержат непосредственно информацию об устройстве, его настройках и компонентах.

Контактные элементы удобны для быстрого «схватывания» Big Data ситуации с уже введенной частью исходных данных и для понимания того, как наиболее быстро и эффективно ввести оставшиеся данные [6].

Big Data открывает новые горизонты в планировании производства, образовании, здравоохранении и других отраслях. Если их развитие будет продолжаться, то технологии Big Data могут поднять информацию, как фактор производства, на совершенно новый качественный уровень. Информация станет не только равноценна труду и капиталу, но и, возможно, станет наиважнейшим ресурсом современной экономики.

Для РИС с использованием Больших данных [6–8] принципиально важен первичный структурный анализ для повышения эффективности обнаружения выбранных шаблонов атаки по представленной модели (см. рис. 3).



За основу построения модели берутся предложенные ранее<sup>1</sup> [2–4, 10] четыре категории обработки Больших данных в процессе работы ЗКУ РВС. Первая категория предполагает содержание в Больших данных определенной информации о вторжениях. Вторая категории содержит полиморфные алгоритмы, запутывающие противника. Наличие вторжений и найденных объектов выявляется в третьей категории, а в четвертой при отсутствии обнаруженных угроз определяются неудачные действия ЗКУ РВС. Обобщенная структура РИС с использованием

Больших данных на основе методики обнаружения вторжений может быть представлена с помощью формулы:

$$N = S(t) + I(t) + R(t) + D(t), \quad (1)$$

где  $N$  — общее количество объектов в системе (общий диапазон до 1600 объектов во всех тестах);

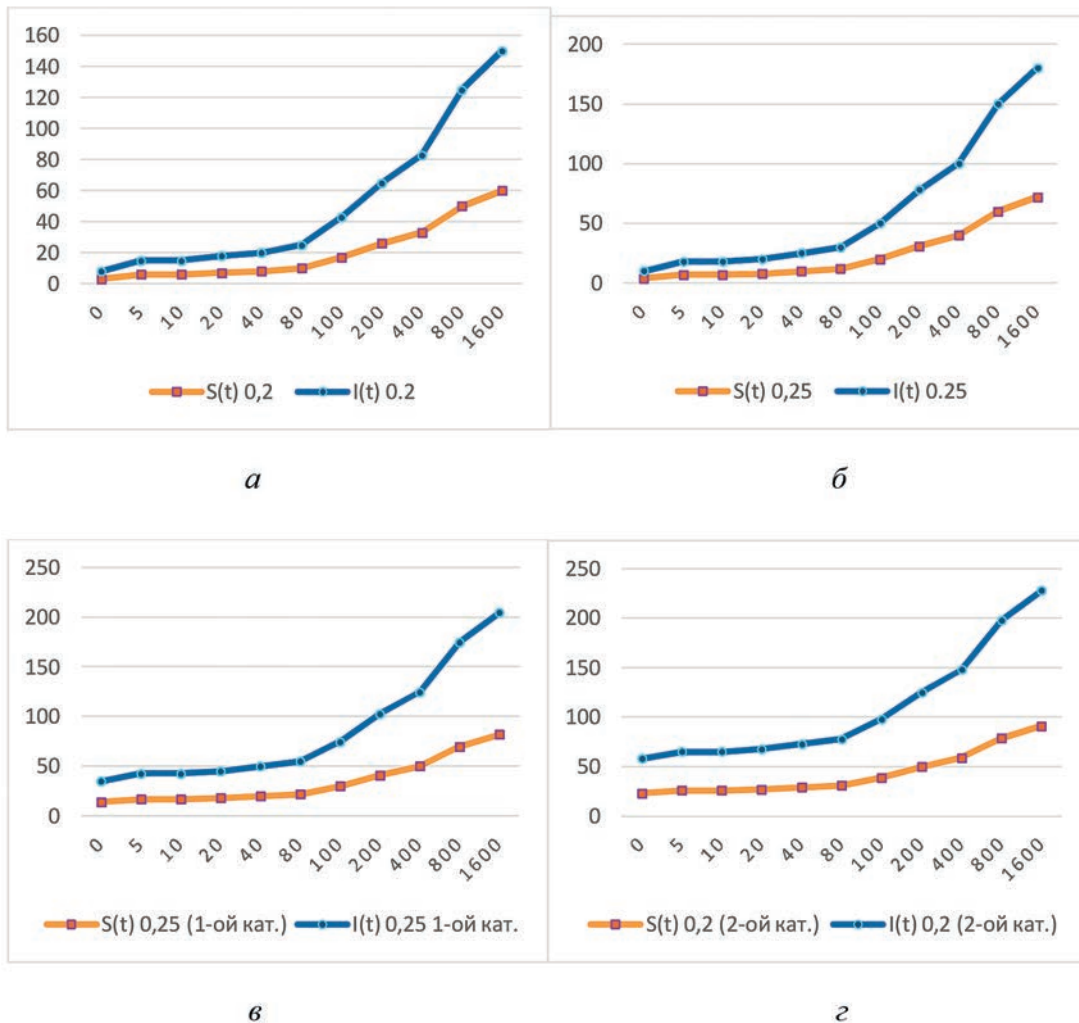
$S(t)$  — количество объектов без действий;

$I(t)$  — количество объектов с действием ( $t$  — примерное время выполнения до 200 сек),

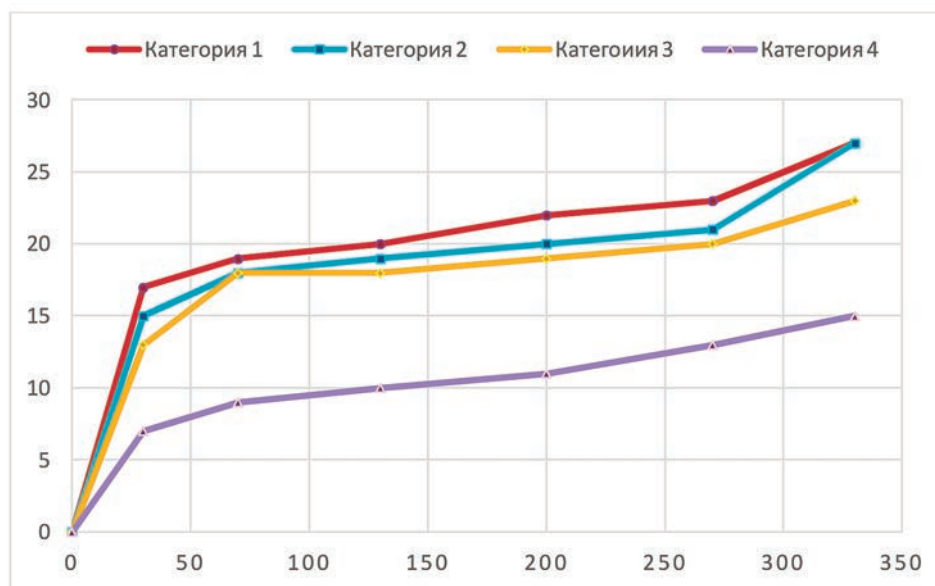
$R(t)$  — количество объектов с действием корреляционного анализа,

$D(t)$  — количество объектов, в которых обнаружено вторжения, запущенный с помощью ЗКУ РВС (см. рис. 4).

<sup>1</sup>Хабрахабр/BigData от А до Я. Часть 1: Принципы работы с большими данными, парадигма MapReduce/ сост.: А. Петров. URL: <https://habrahabr.ru/company/dca/blog/267361/> (дата обращения: 24.07.2019)



**Рис. 4.** Зависимости изменения количества узлов от времени функционирования  
 а –  $\beta = 0,2$ ; б –  $\beta = 0,25$  и  $k = 0,02$ ; в — первый этап сбора данных,  $\beta = 0,25$ ,  $k = 0,02$ ,  
 г — второй этап сбора данных, при  $\beta = 0,25$ ,  $k = 0,02$



**Рис. 5.** Оценка вероятности обнаружения вторжений ЗКУ РВС в ходе различных атак (оранжевым цветом — для категории 1, синим — для категории 2, желтым — для категории 3, лиловым — для категории 4)

Полученные зависимости изменения количества пораженных узлов от времени функционирования РИС [7] в условиях распространения вторжения представлены на рис. 4 (горизонтальная шкала — количество объектов в системе, вертикальная — время обнаружения вторжений в сек).

Из рис. 5 следует, что по совершенным операциям распространение ошибок в предлагаемой ЗКУ РВС [1] значительно возрастает к обработке по категориям Б и В, однако их уровень не так критичен. Данные результаты расчетов объясняются лишь тем, что чем больше действий приводят к обнаружению вторжений, тем больше увеличиваются риски ИБ для ПО<sup>1</sup>. Во всех проведенных тестах демонстрируется вероятность успеха различного рода атак, которая практически никогда не доходила до 100%, в то время как вероятность не обнаружения многих действий нарушителя всегда была от 50%.

### Заключение

Предложенная модель обнаружения вторжений с использованием Больших данных в качестве среды РИС повышает эффективность выявления различного рода атак при помощи временных рядов. Была осуществлена совокупность мер с использованием полученных данных и информации, расширенной благодаря применению иерар-

хического набора показателей, которые, в свою очередь, основываются на анализе временных рядов. За счет постоянного отслеживания и пересчета показателей пользователей данный способ позволяет снизить уровень возможных потерь от компьютерных атак.

### Литература

1. Косов Н.А., Гельфанд А.М., Лантев А.А. Анализ темных данных для обеспечения устойчивости информационных систем от нарушения конфиденциальности или несанкционированных действий // *Colloquium-journal*. 2019. № 13–2 (37). С. 100–103.
2. Котенко И.В., Ушаков И.А. Модели NoSQL баз данных для мониторинга кибербезопасности // Сборник научных статей VII Международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (Апино 2018)» (Санкт-Петербург, 28 февраля–01 марта 2018 г.). СПб., 2018. Т. 1. С. 498–501.
3. Котенко И.В., Ушаков И.А., Пелёвин Д.В., Овраменко А.Ю. Гибридная модель базы данных NoSQL для анализа сетевого трафика // *Защита информации*. Инсайд. 2019. № 1 (85). С. 46–54.
4. Котенко И.В., Ушаков И.А. Базы данных безопасности корпоративной сети: применение SQL и NoSQL технологий // *Региональная информатика и информационная безопасность: сборник трудов*. 2017. № 4. С. 254–255.
5. Котенко И.В., Ушаков И.А. Использование технологий больших данных для мониторинга инцидентов информационной безопасности // *Материалы Юбилейной XV Санкт-Петербургской международной конференции «Региональная*

<sup>1</sup>Хабрхабр//BigData от А до Я. Часть 1: Принципы работы с большими данными, парадигма MapReduce/ сост.: А. Петров. URL: <https://habrahabr.ru/company/dca/blog/267361/> (дата обращения: 24.07.2019)



информатика «РИ-2016» (Санкт-Петербург, 26–28 октября 2016 г.). СПб.: Политехника-принт, 2016. С. 168–169.

6. *Леснова Е. М., Пестов И. Е.* Разработка метода обнаружения и коррекции ошибок для распределенной информационной сети на основе больших данных // Материалы XVI Санкт-Петербургской международной конференции «Региональная информатика «РИ-2018» (Санкт-Петербург, 24–26 октября 2018 г.). СПб., 2018. С. 570–571.

7. *Федин М. В.* Перспективы использования систем обработки больших данных (Big Data) в металлургической промышленности // *Economics*. 2015. № 8 (9). С. 52–54.

8. *Штеренберг С. И., Полтавцева М. А.* Распределенная система обнаружения вторжений с защитой от внутреннего

нарушителя // *Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы*. 2018. № 2. С. 59–68.

9. *Ушаков И. А., Котенко И. В., Крылов К. Ю.* Анализ методик применения концепции больших данных для мониторинга безопасности компьютерных сетей // Материалы IX Санкт-Петербургской межрегиональной конференции «Информационная безопасность регионов России (ИБРР-2015)» (Санкт-Петербург, 28–30 октября 2015 г.). СПб., 2015. С. 75–76.

10. *Дешевых Е. А., Ушаков И. А., Чечулин А. А.* Интеграция SIEM-систем с системами корреляции событий безопасности, основанных на технологии больших данных // Материалы 9-й конференции «Информационные технологии в управлении (ИТУ-2016)» (Санкт-Петербург, 4–6 октября 2016 г.). СПб., 2016. С. 684–687.

---

## THE USE OF BIG DATA IN THE ANALYSIS OF BIG DATA IN COMPUTER NETWORKS

### GRIGORY A. ORLOV

St. Petersburg, Russia, grigory.a.orlov@gmail.com

### ANDREY V. KRASOV

St. Petersburg, Russia, krasov@inbox.ru

### ARTEM M. GELFAND

St. Petersburg, Russia, amgelfand@mail.ru

### ABSTRACT

The concept of Big Data includes the totality of all data sets, the total size of which is several times larger than the capabilities of conventional databases. It is also necessary to note the use of non-classical data processing methods. For example, in the management, analysis of information received, or simply storage. Big Data algorithms have emerged in parallel with the introduction of the first high-performance servers of their kind, such as the mainframe, which have sufficient resources required for operational information processing, as well as corresponding to computer calculations with subsequent analysis. The algorithms are based on performing series-parallel calculations, which significantly increases the speed of performing various tasks. Entrepreneurs and scientists are interested in Big Data, who are concerned with issues related to not only high-quality, but also up-to-date interpretation of data, as well as creating innovative tools for working with them. A huge amount of data is processed in order for the end user to get the results they need for their further effective use. Big Data enables companies to expand the number

**KEYWORDS:** Big Data; introduction; resources; algorithms; computer computing; interpretation; performance.

of their customers, attract new target audiences, and also helps them implement projects that will be in demand not only among current customers, but also attract new ones. Active implementation and subsequent use of Big Data correspond to the solution of these problems. In this paper, we compare the main types of databases and analyze intrusion detection using the example of distributed information system technologies for processing Big Data. Timely detection of intrusions into data processing systems is necessary to take measures to preserve the confidentiality and integrity of data, as well as to correctly correct errors and improve the protection of the data processing system.

### REFERENCES

1. Kosita N. A., Gelfand A. M., Laptev A. A. Analysis of dark data to ensure sustainability information systems from breach of privacy or unauthorized actions. *Colloquium-journal*. 2019. No. 13-2 (37). Pp. 100-103. (In Rus)

2. Kotenko I., Ushakov I. Models of NoSQL databases for cybersecurity monitoring. *Sbornik nauchnykh statey VII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy i nauchno-metodicheskoy konferentsii "Aktual'nye problemy infotelekkommunikatsiy v nauke i obrazovanii (Apino 2018)"* [Proc of scientific articles of the VII International scientific-technical and scientific-methodical conference "Actual problems of infotelecommunications in science and education (Apino 2018)", Saint Petersburg, February 28-March 01, 2018]. St. Petersburg, 2018. Vol. 1. Pp. 498-501. (In Rus)
3. Kotenko I.V., Ushakov I.A., Pelevin D.V., Ovramenko A. Yu. Hybrid NoSQL database model for analysis of network traffic. *Zashita informacii. Inside*. 2019. No. 1 (85). Pp. 46-54. (In Rus)
4. Ushakov I., Kotenko I. Model of discovery an inside attacker based on Big Data technologies. *Proceedings Regional informatics and information security*. 2017. No. 4. Pp. 254-255. (In Rus)
5. Kotenko I.V., Ushakov I.A. Using Big Data technologies to monitor information security incidents. *Proceedings of the XV St. Petersburg international conference "Regional informatics (RI-2018)"*, St. Petersburg, October 26-28 2016. St. Petersburg, 2016. Pp. 168-169. (In Rus)
6. Lesnova E., Pestov I. Development of the method of detection and correction errors for Big Data based distributed information network. *Proceedings of the XVI St. Petersburg international conference "Regional informatics (RI-2018)"*, St. Petersburg, October 24-26, 2018. St. Petersburg, 2018. Pp. 570-571. (In Rus)
7. Fedin M. Prospects of using Big Data in the steel industry. *Economics*. 2015. No. 8 (9). Pp. 52-54. (In Rus)
8. Shterenberg S.I., Poltavtseva M.A. Distributed intrusion detection system with protection against internal intruder. *Information Security Problems. Computer Systems*. 2018. No. 2. Pp. 59-68. (In Rus)
9. Ushakov I.A., Kotenko I.V., Крылов К. Ю. Analysis of methods of application of the Big Data concept for monitoring the security of computer networks. *Proceedings of the IX St. Petersburg interregional conference "Information security of Russian regions (ISRR-2015)"*, St. Petersburg, October 28-30, 2015. St. Petersburg, 2015. C. 75-76. (In Rus)
10. Deshevyykh E.A., Ushakov I.A., Chechulin A.A. Integratsiya SIEM-sistem s sistemami korrelyatsii sobytii bezopasnosti, osnovannykh na tekhnologii bol'shikh dannykh [Integration of SIEM systems with security event correlation systems based on big data technology]. *Materialy 9-y konferentsii "Informatsionnye tekhnologii v upravlenii (ITU-2016)"* [Proc of the 9th conference "Information technologies in management (ITU-2016)", St. Petersburg, October 4-6, 2016]. St. Petersburg, 2016. Pp. 684-687. (In Rus)

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Orlov G. A., student of The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunication;  
Krasov A. V., PhD, Docent, Lecture of The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunication;  
Gelfand A. M., postgraduate student of The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunication.

---

**For citation:** Orlov G. A., Krasov A. V., Gelfand A. M. The use of Big Data in the analysis of big data in computer networks. *H&ES Research*. 2020. Vol. 12. No. 4. Pp. 76-84. doi: 10.36724/2409-5419-2020-12-4-76-84 (In Rus)

