

# H&ES RESEARCH

Научно-технический журнал

Scientific and Technical Journal

## 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:

- 05.07.00 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», 2021

**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 2021

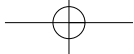
ISSN 2409-5419 (Print)

ISSN 2412-1363 (Online)

[WWW.H-ES.RU](http://WWW.H-ES.RU)

Дата выхода: 25 августа 2021

4 T.13  
2021



## СОДЕРЖАНИЕ

### 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;  
**ГОНЧАРОВСКИЙ 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, корп. 1, офис 323.

### 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.

### АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

#### Духновский Д.А., Смагин А.А., Шкурин М.В.

К вопросу увеличения дальности полёта электрифицированных магистральных летательных аппаратов

4

#### Чибизов А.А., Поджарская М.С.,

#### Трофимов А.А., Смагин Д.И.

Методика определения оптимальных характеристик реек системы контроля перекоса механизации крыла

12

### РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

#### Косяк А.И., Донцов Д.В., Якимова И.А.

Расчет своевременности передачи запроса в режиме двойного использования канала сигнализации

18

#### Курчидис В.А., Анисимов О.В.,

#### Пугачев А.Ю., Пушкин К.А.

Формирование дескриптивных диагностических запросов при техническом диагностировании радиоэлектронной аппаратуры

28

### ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

#### Большаков А.С., Жила А.И., Осин А.В.

Управление информационной безопасностью персональных данных с использованием нечеткой логики

37

#### Бочков А.П., Проурзин В.А., Проурзин О.В.

Анализ больших данных надежности невосстанавливаемых многоканальных систем

49

#### Фабияновский И.Н., Николаев В.В., Саенко И.Б.

Применение блокчейн-технологии в критических распределенных информационных системах: концептуальные основы

56

#### Шемякин С.Н., Пестов И.Е.,

#### Ильин М.В., Рудченко Н.А.

Теоретическая оценка использования математических методов прогнозирования загрузки виртуальной инфраструктуры

66



# CONTENTS

## AVIATION, SPACE-ROCKET HARDWARE

**Dukhnovsky D. A., Smagin A. A., Shkurin M. V.**

To the issue of increasing the flight range  
of electrified mainline aircraft

4

**Chibizov A.A., Podzharskaya M.S.,  
Trofimov A.A., Smagin D.I.**

The method of determining the optimal characteristics  
of the rails of the wing mechanization skew control system

12

## RF TECHNOLOGY AND COMMUNICATION

**Kosyak A.I., Dontsov D.V., Yakimova I.A.**

Calculation of the timeliness of transmission of a request  
in the mode of dual use of the signaling channel

18

**Kurchidis V.A., Anisimov O.V.,  
Pugachev A.Y., Pushkin K.A.**

Formation of descriptive diagnostic requests  
for technical diagnostics of electronic equipment

28

## INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

**Bolshakov A.S., Zhila A.I., Osin A.V.**

Fuzzy logic data protection management

37

**Bochkov A. P., Prourzin V. A., Prourzin O.V.**

Big data analysis of reliability of non-restorable  
multichannel systems

49

**Fabijanovskij I.N., Nikolaev V.V., Saenko I.B.**

Application of blockchain technology in critical distributed  
information systems: conceptual foundations

56

**Shemyakin S.N., Pestov I.E.,  
Ilin M.V., Rudchenko N.A.**

Theoretical assessment of mathematical methods  
usage for predicting virtual infrastructure load

66

### 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;  
**KIRPANEEV 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, bild. 1, office 323;

### 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 pub-  
lisher. 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.

doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-4-4-11

# К ВОПРОСУ УВЕЛИЧЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ ПОЛЁТА ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

**ДУХНОВСКИЙ**

**Денис Аскольдович<sup>1</sup>**

**СМАГИН**

**Андрей Андреевич<sup>2</sup>**

**ШКУРИН**

**Максим Викторович<sup>3</sup>**

## АННОТАЦИЯ

Введение: в настоящее время обсуждение частичной и полной электрификации в авиационном сообществе уже вышло за рамки дискуссий и перешло к созданию первых прототипов. Скорость популяризации идей о необходимости скорейшего перехода к электрифицированной авиационной технике вызывает беспокойство так как существует ряд принципиальных трудностей перехода к электрификации, которые почти не обсуждаются, в частности - отсутствие снижения массы самолёта в полёте. Цель исследования: Целью исследования является определение возможного сценария функционирования и конструктивных особенностей электрифицированного самолёта, использующего в качестве источника энергии для совершения полёта аккумуляторные батареи с учётом конструктивных и эксплуатационных ограничений и особенностей. Результаты: Предложены возможные конструктивные меры по размещению аккумуляторных батарей в конструкции планера с учётом конструкторских, технологических и эксплуатационных ограничений. Описан принципиальный недостаток электрифицированных летательных аппаратов – постоянство массы в течении полёта. Предложены варианты обеспечения снижения массы летательного аппарата во время полёта по мере расходования энергии. Предложена концепция многоступенчатого самолёта и описан возможный сценарий его функционирования. Практическая значимость: Полученное знание может быть полезно для дальнейших исследований в области электрификации авиации, как с точки зрения теоретических исследований, так и с точки зрения формирования концептуальных и обликковых решений на ранних этапах проектирования. Обсуждение: Полученные результаты позволяют сделать вывод о высокой степени сложности и новаторства требуемых трансформаций авиационных комплексов при включении в них полностью электрифицированного самолёта. Это влечёт за собой необходимость внесения изменений не только в конструкцию планера самолёта, но и в сценарий его функционирования и в нормативные документы, регламентирующие безопасность полётов. Таким образом необходимо в дальнейшем точно установить границы допустимости подобных решений и определить алгоритм оценки их экономической эффективности с учётом влияния на окружающую среду.

## Сведения об авторах:

<sup>1</sup> инженер НИО-101, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия, dukhnovskiyalm@gmail.com

<sup>2</sup> аспирант кафедры 104 "Технологическое проектирование и управление качеством" МАИ, (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия, smagin\_9595@mail.ru

<sup>3</sup> старший преподаватель кафедры 101 "Проектирование и сертификация авиационной техники", Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия, m.shkurin@mai.ru

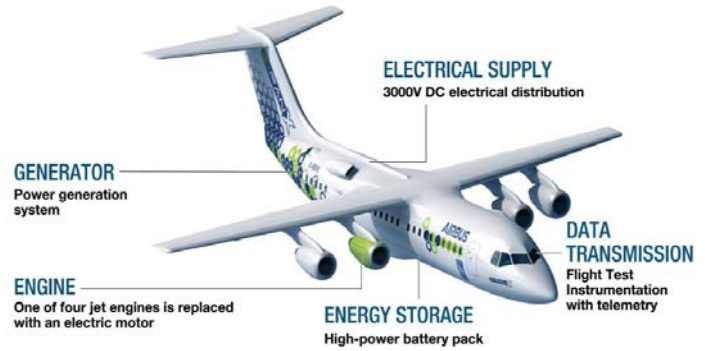
**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** магистральная авиация; электрификация авиационной техники; перспективы развития авиации; эксплуатация авиационной техники; безопасность полётов; многоступенчатый самолёт, электрический самолёт.

**Для цитирования:** Духновский Д. А., Смагин А. А., Шкурин М. В. К вопросу увеличения дальности полёта электрифицированных магистральных летательных аппаратов // Научные исследования в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 4. С. 4-11. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-4-4-11

**Введение**

Рост объемов авиаперевозок [1] в совокупности с ухудшением экологической [2,3] обстановки ставит перед разработчиками и эксплуатантами авиационной техники задачу поиска альтернативных методов запасания энергии для совершения полёта [4]. В той или иной мере проработке подвергались различные виды биотоплив [5], созданных на основе продуктов переработки растительной биомассы, ядерные силовые установки [6], двигатели, применяющие криогенное топливо [7] и электрические установки [8,9]. Повсеместное и широкое использование электроэнергии, простота и доступность ее получения, сравнительно высокая экологичность делают концепцию «полностью электрического самолета» довольно привлекательной [10]. В настоящее время ведущие авиационные производители, в частности, «AIRBUS» [11], создают испытательные стенды и опытные образцы подобных летательных аппаратов, правда, преимущественно в сегменте малой авиации (см. рис. 1, 2).

– хотя «AIRBUS» анонсировала работы над гибридным самолетом AIRBUS E-FAN X [13,14] (рис. 3).



**Рис. 3.** Проект экспериментального самолета Airbus E-Fan X с гибридной силовой установкой

Лишь один из четырёх двухконтурных турбореактивных двигателей этой машины заменён на электрический, мощностью порядка 2МВт. Его предполагается запитать от блоков силовых аккумуляторов, причем на борту самолета дополнительно установлен турбогенератор. Данный демонстратор предназначается, в первую очередь, для исследования процессов преобразования энергии и отработки силовых электроцепей сверхвысокой мощности. Настоящая статья посвящена концептуальному рассмотрению ключевых проблем электрификации пассажирских магистральных самолетов, субъекты исследования будут приведены ниже.

**Проблемы практической реализации электрификации самолётов**

Итак, переходу на электротягу препятствуют ряд технических и концептуальных проблем. Одна из основных технических сложностей заключается в том, что энергетическая емкость самых совершенных с точки зрения весовой отдачи аккумуляторов (литий-полимерных и литий-ионных) на два порядка меньше, чем у той же единичной массы углеводородных топлив (см. табл. 1).

Таблица 1

Сравнение энергоёмкости различных источников энергии

Наименование источника энергии	Показатель теплотворности в пересчете на 1 кг массы
Свинцово-кислотная силовая АКБ	25 (Вт*час)/кг
Литий-ионная силовая АКБ	110 (Вт*час)/кг
Литий-полимерная силовая АКБ	180 (Вт*час)/кг
Авиационный керосин	15 385 (Вт*час)/кг
Авиационный высокооктановый бензин	17 183 (Вт*час)/кг
Водород	368 889 (Вт*час)/кг

Между тем, для дальнемагистрального самолета, облик которого синтезируется путем многопараметрической оптимизации, увеличение относительных масс каких-либо агрегатов, топлива или полезной нагрузки на несколько процентов приводит к существенному ухудшению показателей дальности и экономической эффективности. Для наглядности приведём уравнение существования самолёта в относительном виде. Относительные массы самолёта приведены к взлётной массе.



**Рис. 1.** Самолет на электротяге Airbus E-FAN



**Рис. 2.** Самолет Extra-330LE, оснащенный электродвигателем мощностью 260 кВт производства компании Siemens

Применительно к магистральной пассажирской авиации, электрификация затронула только частичный отказ от пневмогидравлических исполнительных механизмов систем управления механизацией крыла [12] (самолеты SSJ-100 и ряд других) или уборки-выпуска шасси. Использование силовых установок с электротягой на пассажирских авиалайнерах в настоящее время практической реализации не нашло

$$1 = \bar{m}_{кон.} + \bar{m}_{с.у.} + \bar{m}_{топ.} + \bar{m}_{об.упр.} + \bar{m}_{ц.н.} + \bar{m}_{служеб.н.}, \quad (1)$$

где:

$\bar{m}_{кон.}$  – относительная масса конструкции;

$\bar{m}_{с.у.}$  – относительная масса силовой установки;

$\bar{m}_{топ.}$  – относительная масса топлива;

$\bar{m}_{об.упр.}$  – относительная масса оборудования и систем

управления;

$\bar{m}_{ц.н.}$  – относительная масса целевой нагрузки;

$\bar{m}_{служеб.н.}$  – относительная масса служебной нагрузки.

Гипотетически можно предположить, что исследования принципиально новых типов аккумуляторных батарей (АКБ), в том числе построенных на принципе сверхпроводимости [15, 16], приведут к появлению силовых аккумуляторов, не уступающих по энергоёмкости авиационному топливу, однако это допущение не исключает ряда других сложностей.

Второе отличие электрического энергоносителя является принципиальным и заключается в том, что его масса не меняется сколько-нибудь значительным образом в процессе отдачи энергии, в то время как классическое углеводородное топливо сгорает, что приводит к непрерывному уменьшению массы летательного аппарата (ЛА) в процессе выполнения полёта. Уменьшение массы, в свою очередь, снижает величину потребной тяги на заданном эшелоне, что позволяет дальнемагистральным самолетам совершать беспосадочные перелеты на дистанции до 10-12 тысяч километров. Так для самолётов с большой дальностью полёта (относительная масса энергоносителя равна 0,6) потеря в дальности только за счёт постоянства массы может достигать 35%, а с увеличением относительной массы энергоносителя, потери дальности электрического самолёта в сравнении с традиционным будут только возрастать [17]. Применительно к ЛА, оснащёнными электрическими силовыми установками, для сохранения близкой к существующим самолетам дальности требуется реализовать уменьшение их массы в полёте, то есть избавиться от разряженных АКБ. Таким образом происходит переход к многоступенчатой концепции летательного аппарата. Такая концепция является широко используемой в ракетной технике [18]. Имело место её рассмотрение применительно к авиации. Естественно, сброс не может быть произведен в произвольных местах и без привязки к функционированию наземной инфраструктуры. Наглядным образом зависимость дальности полёта от относительного изменения массы самолёта, демонстрирует формула Бреге.

$$L = \frac{K \times V}{C} \times \ln \left( \frac{m_1}{m_2} \right), \quad (2)$$

где:

$L$  – дальность горизонтального полёта самолёта;

$K$  – аэродинамическое качество самолёта;

$V$  – скорость горизонтального полёта;

$C$  – удельный расход топлива в советующих условиях горизонтальном полёте;

$m_1$  – масса самолёта в начале горизонтального полёта;

$m_2$  – масса самолёта в конце горизонтального полёта.

Размещение АКБ на самолете также потребует значительных компоновочных объемов на борту ЛА. Приняв в качестве допущения равенство энергоёмкости единичной массы аккумулятора и керосина можно определить, что потребный компоновочный объем сохранится. Тем не менее, он все равно требует отведения значительных свободных пространств в агрегатах планера, а также, очевидно, потребуются предусматривать в конструкции большее количество разъёмных соединений, необходимых для обслуживания и/или замены аккумуляторов в процессе эксплуатации.

Субъектами исследования данной работы как раз и являются конструктивно-компоновочные (размещение АКБ на самолете и конструктивная реализация их сброса) и эксплуатационно-инфраструктурные (выбор рациональных мест сброса АКБ) прикладные аспекты электрификации самолетов.

Следует отметить, что в качестве граничных условий области исследования рассмотрен определенный тип ЛА – средне- и дальнемагистральные пассажирские самолеты нормальной аэродинамической схемы, ибо именно эти классы гражданских летательных аппаратов рискуют попасть в зону вырождения при переходе к запасанию электроэнергии для совершения полёта при отсутствии новых концептуальных решений.

В качестве допущения принято, что энергоёмкость единичной массы АКБ находится на том же уровне, что и у углеводородного топлива. Такое допущение позволяет учесть высокие темпы увеличения уровня технического совершенства АКБ [19, 20] и тем самым освободиться от ограничений свойственным ближайшим годам и рассмотреть вопрос увеличения дальности электрифицированных самолётов в общем виде.

### Конструктивные меры по размещению АКБ в планере

Сформируем поле возможных компоновочных решений по размещению блоков силовых АКБ на борту ЛА, указав преимущества и недостатки каждого варианта. Очевидно, что компоновка должна выполняться таким образом, чтобы в процессе сброса АКБ исключить существенное изменение центровки самолета.

1) Компоновка, при которой блоки АКБ размещены в крыле. По сути, они заменяют топливные баки. Как уже было описано выше, потребный объем при принятых допущениях будет равен или немного превышать компоновочных объем при использовании классического углеводородного топлива. Однако, реализация процесса сброса разряженных АКБ при такой компоновке становится крайне затруднительной, поскольку требует организации больших вырезов в крыле, что невозможно для кессонных конструктивно-силовых схем (КСС), а открытие крупноразмерных створок в полёте создает существенную угрозу с точки зрения управляемости и прочности ЛА.

2) Компоновка с размещением блоков АКБ в фюзеляже. Приводит к увеличению миделевого сечения, уменьшается разгрузка крыла от изгибающего момента весом топлива, снижается пассажироместимость или уменьшаются размеры багажных отсеков. Тем не менее, гораздо проще организовать сброс АКБ путем размещения на самолете

специального отсека, аналогичного по компоновке и раскрою створок бомбовому отсеку. Частичную компенсацию занятых подпольных пространств фюзеляжа можно организовать путем поднятия уровня пола и перемещения багажных отсеков в район центроплана.

3) Конформное размещение АКБ. Накладные (внешние) блоки в процессе выполнения полёта сбрасываются, что уменьшает не только массу, но и мидель ЛА в процессе полёта. Тем не менее, траектория их отделения, так или иначе, создает потенциальную опасность повреждения элементов конструкции планера, а монтаж конформных блоков на земле затруднителен и требует применения особой оснастки и приспособлений.

4) Модульное размещение АКБ на самолете. Может быть выполнено путем установки на основном самолете-носителе одного или нескольких модулей АКБ, представляющих собой автономные беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Они могут размещаться на внешней подвеске над фюзеляжем или под крылом. По мере разряда модули АКБ должны отделяться от носителя и совершать посадку в планирующем режиме. Другой вариант этой концепции – быстросменные модули, замена которых производится во время промежуточной посадки в аэропорту. Очевидно, что выполнение дополнительных посадок практически является недопустимым, ибо не только вынуждает затрачивать энергию на набор высоты несколько раз, но и дополнительно загружает аэропорты, увеличивает время перелёта. Каждый из этих факторов негативно влияет на стоимость выполнения транспортной операции.

5) Стационарное размещение АКБ на борту самолета, не подразумевающее их сброс в процессе выполнения полёта. Заряд аккумуляторов должен производиться в полёте от других ЛА – «дозарядчиков». С точки зрения работы наземной инфраструктуры и аэродромной спецтехники, этот вариант наиболее предпочтителен, поскольку позволяет оставить их практически без изменений по сравнению с имеющимися для самолетов с газотурбинными двигателями (ГТД). Компоновка такого самолета, ввиду отсутствия системы сброса, существенно упрощается, повышается надежность и весовая отдача. Сложность состоит в крайне высоких требованиях к технике пилотирования в процессе дозарядки, продолжительности этого процесса и появлении в авиакомплексе еще одного или нескольких ЛА, нуждающихся в летных экипажах или сложных системах автоматического полёта. Так же авиационный комплекс становится перенасыщенным, ибо для его функционирования в него фактически уже входит два летательных аппарата, что ведёт к росту стоимости и сложности эксплуатации.

#### Методы отделения АКБ от планера

Теперь перейдем к рассмотрению способов реализации отделения блоков разряженных АКБ от ЛА. Техническая сложность заключается в необходимости организации на блоках АКБ силовых разъемов, автоматически отстыковываемых перед сбросом, а также влаго-, вибро-, термо- и ударозащиты корпусов блоков АКБ при минимальной массе последних. Концепция отделяемых АКБ также создаёт существенную дополнительную нагрузку на службы управления воздушным движением (СУВД), так как существует риск поражения ЛА, выполняющих полёт на малых высотах,

блоками АКБ, сброшенными с верхних эшелонов, не говоря уже об угрозе для наземных сооружений. Сброс с больших высот дает низкую точность, с малых – требует введения в профиль полёта дополнительных участков снижения и набора высоты, что приводит к повышенным энергозатратам на полёт.

Очевидно, что достичь в полёте непрерывного уменьшения массы, как в случае ЛА, оснащенных ГТД, невозможно, однако, повышение частоты сброса будет давать приближённую к ним зависимость изменения массы.

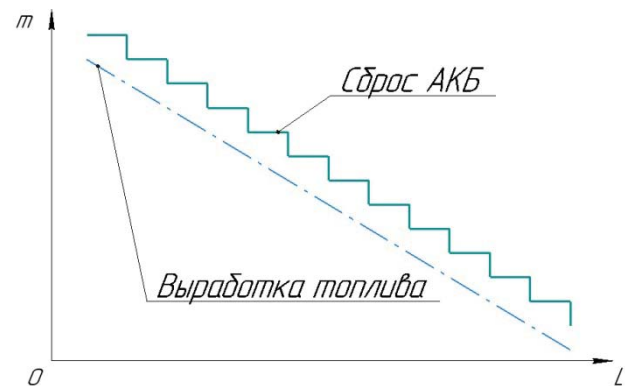


Рис. 4. Тенденция изменения массы энергоносителя летательного аппарата при совершении полёта

1. В рамках концепции «дозарядки» в воздухе сброс отсутствует. Это позволяет исключить большинство недостатков, перечисленных в предыдущем абзаце, хотя повышенный риск возникновения аварийных ситуаций при совместном полёте «дозарядчика» и основного ЛА и наличие в воздухе большого количества дополнительных ЛА, обслуживающих воздушные трассы, не способствует снижению нагрузки на СУВД или повышению безопасности полёта.

2. Родственной по принципу построения авиационного комплекса с концепцией с дозарядкой, является концепция спуска израсходованных АКБ из магистрального самолёта единым пакетом на трассе в специально отведённых географических зонах с последующим перехватом АКБ пакета другим летательным аппаратом, который в свою очередь осуществит безопасный спуск АКБ. Большая возможная длина трассы позволит обеспечить большее расстояние между двумя взаимодействующими ЛА, что снижает требования к точности выполнения манёвра и повышает его безопасность по сравнению с дозарядкой в полёте.

3. Отделение парашютным способом. Вертикальная скорость снижения после раскрытия парашюта сравнительно мала (6-9 м/с) [21], а применение парашюта после затяжного падения с большой скоростью может приводить к обрыву строп. Совокупность этих факторов приводит к длительному нахождению блоков АКБ в воздухе и созданию помех в зоне сброса. Парашютные системы необходимо переукладывать после каждого применения, что плохо поддаётся автоматизации и трудоёмко. Точность сброса виду большого рассеивания группы сброшенных АКБ низка.

4. Сброс свободнопадающих АКБ с последующим раскрытием корпуса для снижения вертикальной скорости, наподобие современных авиационных средств пораже-

ния (после затяжного падения открываются крылышки или специальные лопасти, вызывающие авторотацию падающего объекта и торможение его скорости). В этом случае время снижения уменьшается, упрощается подготовка к последующему применению.

5. Планирующий полёт одиночных/групповых блоков АКБ, в том числе и управляемый (блоки фактически представляют собой малый беспилотный летательный аппарат), совершающих посадку в определённом месте. Способ даёт высокую точность, но сложен с точки зрения инженерной реализации и требует значительного остаточного заряда на АКБ для поддержания работы системы управления после отделения.

6. Сброс ударозащищённых блоков АКБ при проходе ЛА на сверхмалых (5-10 м) высотах над спецзоной, в которой организована специальная площадка с амортизирующими свойствами (поролоновые/пенополиуретановые маты и т.п.). Также даёт высокую точность, исключает вероятность поражения сброшенными блоками других ЛА, сбор блоков АКБ легко автоматизируется ввиду кучности их расположения после сброса. Из недостатков можно назвать высокие требования к технике пилотирования и невозможность проведения данной операции в сложных метеорологических условиях, а также необходимость спуска ЛА с эшелона практически до нулевой высоты и последующий набор высоты, что неблагоприятно сказывается на количестве затрачиваемой энергии для совершения перелёта и на безопасности полётов.

7.

#### Возможные стратегии сброса АКБ в процессе эксплуатации

Далее, рассмотрим возможные с точки зрения эксплуатационной инфраструктуры места сброса АКБ. С экономической точки зрения наиболее предпочтительны такие решения, которые позволили бы максимально сохранить инфраструктуру классических аэропортов, принимающих самолёты с ГТД, однако следует учесть, что для обеспечения эксплуатации парка из нескольких десятков дальнемагистральных самолётов потребные мощности объектов наземной электроэнергетики приближаются к мощности атомной электростанции. Очевидно, что в случае сброса АКБ вновь заряженные блоки должны оперативно и бесперебойно по-

ставляться в аэропорт для последующей установки на самолёт, что требует организации дополнительной инфраструктуры, обслуживающей их транспортировку.

1. В рамках концепции «дозарядки» в воздухе, сброс АКБ не производится. В этом случае объекты наземной инфраструктуры могут быть представлены классическими аэропортами и удалёнными от них аэродромами дозарядчиков, в непосредственной близости от которых находятся объекты электроэнергетики.

2. В случае сброса на сверхмалых высотах, также возможно организовать удалённую от основного аэропорта площадку, привязанную к объекту электроэнергетики. Однако, размещение таких площадок возможно только в равнинной местности (подобную технику сброса можно использовать, при наличии влаготацинты, и над водным пространством, но в морских акваториях проблематично создать объекты электроэнергетики).

3. Сброс блоков АКБ вблизи аэропортов любыми способами крайне нерационален, поскольку даёт, по сути, лишь одно преимущество (малая дистанция транспортировки блоков для повторной установки на самолёт) при ряде существенных недостатков:

- чрезмерную загрузку воздушного пространства (современные международные аэропорты принимают около 700-800 самолётов в сутки, если каждый из этих ЛА будет выполнять сброс АКБ, избежать поражения ими других ЛА практически невозможно);

- необходимость наличия в непосредственной близости от аэропорта крупных объектов электроэнергетики;

- повышенную вероятность поражения наземных сооружений;

- рассогласование процессов сброса (на этапе взлёта/посадки производить их бессмысленно, а в процессе полёта по маршруту ЛА нерационально заходить в перегруженное воздушное пространство аэропорта, снижаться во избежание поражения низколетящих ЛА и проводить сброс).

4. Сброс в пустынной местности, удалённой от жилых зон и аэродромов, но вблизи уже существующих объектов электроэнергетики и линейных (железные дороги, автомобильные трассы федерального назначения, крупные судоходные реки) объектов наземной инфраструктуры.

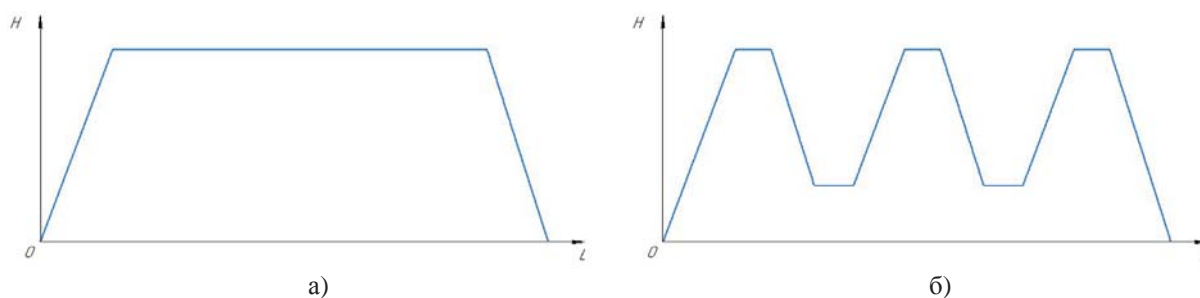


Рис. 5. Профили полётов самолёта с ГТД (а) и самолёта, осуществляющего сброс АКБ с малых высот (б)



По сути, требуются минимальные доработки всех 3 (транспортной, аэродромной, электроэнергетической) составляющих инфраструктуры, но количество уже существующих зон, удовлетворяющих предъявленным требованиям, недостаточно велико для обеспечения полётов значительного парка самолетов. Однако, на ранних этапах перехода на электротягу для сокращения финансовых затрат их использование представляется рациональным.

### Заключение

Подытоживая вышеизложенный материал, можно сделать вывод о теоретической возможности электрификации магистральных самолётов, однако очевидно, что это сопряжено с колоссальными техническими трудностями. Более того, некоторые из предложенных концепций, несмотря на теоретическую осуществимость, сложно поддаются хотя бы умозрительной визуализации, ввиду своих особенностей и отличности от существующих сценариев эксплуатации авиационной техники. Однако, в рамках обеспечения уменьшения массы электрифицированного ЛА в процессе совершения перелёта, на текущем уровне технического развития, к сожалению, альтернатив не так много. Подобные концепции ещё более остро поднимают вопрос целесообразности и практической возможности электрификации магистральных самолётов.

Потребные меры для обеспечения функционирования электрифицированных магистральных авиационных комплексов носят системный характер и диктуют необходимость новых разработок не только в области проектирования, но и внесения изменений в области сертификации и управления воздушным движением.

Перечень сформулированных концепций методов электрификации должен быть подвергнут дополнительному многоитерационному анализу, подкреплённому проекторочными и экономическими расчётами, с целью выявления наиболее перспективного метода электрификации и, что особо важно – выявления условий, при которых эксплуатация электрифицированной авиационной техники станет более благоприятной по сравнению с классической в экономическом плане.

В целом хочется отметить, что на текущем уровне развития техники практическая реализация электрификации возможна, но не представляется целесообразной. Хочется верить, что к моменту возникновения острой необходимости отказа от углеводородных топлив, нам удастся найти средства запаса энергии для совершения полёта, которые будут альтернативны, как углеводородам, так и электроэнергии, накопленной в аккумуляторных батареях.

### Литература

1. Мальцев А. А., Матвеева А. В. Международные пассажирские авиаперевозки: детерминанты взрывного роста. Екатеринбург: Управленец. 2018. Т. 9. № 3.
2. Асатуров М. Л. Загрязнение авиацией высоких слоев атмосферы // Экономика, экология и общество России в 21-м столетии. 2016. С. 442.

3. Нигматуллин Т. Р., Фазуллин А. Ш. Влияние авиационной промышленности на окружающую среду // Молодежный научный вестник. 2017. №. 2. С. 167-170.
4. Слугачев Г. Е. Использование альтернативных источников энергии в авиационной деятельности для снижения отрицательного влияния на окружающую среду // Новейшие достижения и успехи развития технических наук. 2016. С. 13-16.
5. Шади А. Оценка возможности использования биотоплива в воздушных судах гражданской авиации // Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества. 2018. С. 79-80.
6. Nikitaev D., Thomas L. D. Seeded Hydrogen in Nuclear Thermal Propulsion Engines // Journal of Spacecraft and Rockets. 2020. Т. 57. №. 5. С. 907-917.
7. Сотников Д. Н., Котловцева Е. Ю. и Корнеев П. С. Технологические аспекты применения криогенного топлива в гражданской авиации // Студенческий 37-1. 2019. С. 55-61.
8. Tsai M. C. An overview of the research work at the Electric Motor Technology Research Center // Impact. 2020. Т. 2020. №. 4. С. 54-56.
9. Халютин С. П., Халютин О. С. Новые возможности самолётов на электрической тяге // Труды Международного симпозиума «Надёжность и качество». 2017. Т. 2.
10. Халютин С. П. Электрификация летательных аппаратов от пе-2 до полностью электрического самолета. Направления исследований // Электропитание. 2018. №. 4. С. 4-26.
11. Joubert E. et al. The e-fan all electrical aircraft demonstrator and its industrialization // Proceedings of the 30th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. 2016.
12. Халютин С. П. Электрический самолет: прошлое, настоящее, будущее // Авиапанорама: Международный авиационно-космический журнал №6. 2016. 42.
13. Benegas Jayme, Diego. Evaluation of the Hybrid-Electric Aircraft Project Airbus E-Fan X. MS thesis. Aircraft Design and Systems Group (AERO), Department of Automotive and Aeronautical Engineering, Hamburg University of Applied Sciences, 2019.
14. Juvé L., Fosse J., Joubert E., Fouquet N. Airbus Group electrical aircraft program, the E-FAN project // 52nd AIAA/SAE/ASEE «Joint Propulsion Conference». 2016. С. 4613.
15. Shu X. et al. A reliability study of electric vehicle battery from the perspective of power supply system // Journal of Power Sources. 2020. Т. 451. С. 227805.
16. Стычев С. Н., Краснопевцева Н. А., Мальцев С. А. Перспективные направления в развитии аккумуляторов // Новые технологии, инновации, изобретения. 2018. С. 91-93.
17. Dukhnovskiy D. A. Formation of the Area of Possible Existence of Electrified Airplanes // 2020 New Trends in Aviation Development (NTAD). IEEE, 2020. С. 49-53.
18. Balakin V. L., Krikunov M. M. Analysis of control programs and climb paths of the hypersonic first stage of an aerospace system // Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering. 2019. Т. 18. №. 1. С. 18-29.
19. Tariq M. et al. Aircraft batteries: current trend towards more electric aircraft // IET Electrical Systems in Transportation. 2016. Т. 7. №. 2. С. 93-103.
20. Chung S. H., Manthiram A. Current status and future prospects of metal-sulfur batteries // Advanced Materials. 2019. Т. 31. №. 27. С. 1901125.
21. Мамонов С. С., Клочкова И. Ю. Моделирование движения парашютиста при раскрытом парашюте // а а. 2018. Т. 2. №. 2. С. 2.

## TO THE ISSUE OF INCREASING THE FLIGHT RANGE OF ELECTRIFIED MAINLINE AIRCRAFT

**DENIS A. DUKHNOVSKY**

Moscow, Russia, dukhnovskiy calm@gmail.com.

**ANDREY A. SMAGIN**

Moscow, Russia, smagin\_9595@mail.ru

**MAXIM V. SHKURIN**

Moscow, Russia, m.shkurin@mail.ru

**KEYWORDS:** long-haul aviation, electrification of aviation equipment, aviation development prospects, operation of aviation equipment, flight safety, multistage aircraft, electric aircraft.

### ABSTRACT

**Introduction:** The discussion of partial and full electrification in the aviation community has now moved beyond discussions to the creation of the first prototypes. The speed of popularization of ideas about the need for an early transition to electrified aircraft raises concerns because there are a number of fundamental difficulties of transition to electrification, which are almost not discussed, in particular – the lack of weight reduction of the aircraft in flight. **Research Objective:** The purpose of the study is to determine a possible scenario of operation and design features of an electrified aircraft that uses batteries as an energy source for flight, considering the design and operational limitations and features. **Results:** Possible structural arrangements for the placement of batteries in the airframe design, considering the design, technological and operational constraints, are proposed. Described the fundamental disadvantage of electrified aircraft – the constancy of mass during flight. We propose

options to ensure the reduction of the mass of the aircraft during flight as energy is consumed. The concept of a multi-stage airplane is proposed and a possible scenario of its operation is described. **Practical relevance:** The obtained knowledge can be useful for further research in the field of electrification of aviation, both in terms of theoretical research and in terms of the formation of conceptual and design solutions in the early stages of design. **Discussion:** The results allow us to conclude about the high degree of complexity and innovativeness of the required transformation of aircraft complexes when including a fully electrified aircraft. This entails changes not only in the design of the airframe, but also in the scenario of its operation and in the regulatory documents governing flight safety. Thus, it is necessary to further accurately establish the boundaries of admissibility of such solutions and determine an algorithm for assessing their economic efficiency, considering the impact on the environment.

### REFERENCES

1. Mal'cev A. A., Matveeva A. V. International passenger air transportation: determinants of explosive growth. *Upravlenec*. Vol. 9. No. 3. (In Rus)
2. Asaturov M. L. Zagryaznenie aviatsionnoy sredy i obshchestvo Rossii v 21-m stoletii. 2016. P. 442. (In Rus)
3. Nigmatullin T. R., Fazullin A. SH. Vliyaniye aviatsionnoy promyshlennosti na okruzhayushchuyu sredyu. *Molodezhnyy nauchnyy vestnik*. 2017. No. 2. P. 167-170. (In Rus)
4. Slugachev G. E. The use of alternative energy sources in aviation activities to reduce the negative impact on the environment. *The latest achievements and successes in the development of engineering sciences*. 2016. P. 13-16. (In Rus)
5. Shadi A. Ocenka vozmozhnosti ispol'zovaniya biotopliva v vozdushnykh sudakh grazhdanskoy aviatsii. *Grazhdanskaya aviatsiya na sovremennom etape razvitiya nauki, tekhniki i obshchestva*. 2018. P. 79-80. (In Rus)
6. Nikitaev D., Thomas L. D. Seeded Hydrogen in Nuclear Thermal Propulsion Engines. *Journal of Spacecraft and Rockets*. 2020. Vol. 57. No. 5. P. 907-917.
7. Sotnikov D. N., Kotlovceva E. Ju., and Korneev P. S. Technological aspects of cryogenic fuel application in civil aviation. *Studencheskij V*. 37. No. 1. 2019. P. 55-61. (In Rus)
8. Tsai M. C. An overview of the research work at the Electric Motor Technology Research Center. *Impact*. 2020. Vol. 2020. No. 4. P. 54-56.
9. Khaljutin S.P., Khaljutina O.S. Novye vozmozhnosti samoljotov na jelektricheskoy tjage [New possibilities for electric-powered airplanes]. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality"] 2017. Vol. 2. (In Rus)
10. Khaljutin S. P. Electrification of aircrafts - from pe-2 to fully electric aircraft. *Jelektropitanie*. 2018. No. 4. P. 4-26. (In Rus)

11. Joubert E. et al. The e-fan all electrical aircraft demonstrator and its industrialization. *Proceedings of the 30th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences*. 2016.
12. Khaljutin S. P. Electric airplane: past, present, future. *Aviapanorama: Mezhdunarodnyi avatsionno-kosmicheskiy zhurnal* [Aviapanorama: International aerospace magazine] No. 6. 2016. 42. (In Rus)
13. Benegas Jayme, Diego. Evaluation of the Hybrid-Electric Aircraft Project Airbus E-Fan X. MS thesis. Aircraft Design and Systems Group (AERO), Department of Automotive and Aeronautical Engineering, Hamburg University of Applied Sciences, 2019.
14. Juve L., Fosse J., Joubert E., Fouquet N. Airbus Group electrical aircraft program, the E-FAN project. *52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*. 2016. P. 4613.
15. Shu X. et al. A reliability study of electric vehicle battery from the perspective of power supply system. *Journal of Power Sources*. 2020. Vol. 451. P. 227805.
16. Stychev S. N., Krasnopevceva N. A., Mal'cev S. A. Perspektivnye napravleniya v razvitii akkumulyatorov. *Novye tekhnologii, innovacii, izobreteniya*. 2018. P. 91-93. (In Rus)
17. Dukhnovskiy D. A. Formation of the Area of Possible Existence of Electrified Airplanes. *2020 New Trends in Aviation Development (NTAD)*. IEEE, 2020. P. 49-53.
18. Balakin V. L., Krikunov M. M. Analysis of control programs and climb paths of the hypersonic first stage of an aerospace system. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 18. No. 1. P. 18-29. (In Rus)
19. Tariq M. et al. Aircraft batteries: current trend towards more electric aircraft. *IET Electrical Systems in Transportation*. 2016. Vol. 7. No. 2. P. 93-103.
20. Chung S. H., Manthiram A. Current status and future prospects of metal-sulfur batteries. *Advanced Materials*. 2019. Vol. 31. No. 27. P. 1901125.
21. Mamonov S. S., Klochkova I. YU. Modelirovanie dvizheniya parashyutista pri raskrytom parashyute. a a. 2018. Vol. 2. No. 2. P. 2. (In Rus)

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS:

**Denis Askoldovich Dukhnovskiy**, engineer of R&D Aircraft Design and Certification Department, Moscow Aviation Institute (National Research University), dukhnovskiy calm@gmail.com

**Andrey Andreevich Smagin**, post-graduate student of Technological Design and Quality Management Department, Moscow Aviation Institute (National Research University), smagin\_9595@mail.ru

**Maksim Viktorovich Shkurin**, Senior Lecturer, Aircraft Design and Certification Department, Moscow Aviation Institute (National Research University), m.shkurin@mai.ru

---

**For citation:** Dukhnovsky D. A., Smagin A. A., Shkurin M. V. To the question of increasing the range of electrified mainline aircraft. *H&ES Reserch*. 2021. Vol. 13. No. No 4. P. 4-11. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-4-4-11 (In Russian)

doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-4-12-17

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЕК СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПЕРЕКОСА МЕХАНИЗАЦИИ КРЫЛА

**ЧИБИЗОВ**

**Александр Александрович<sup>1</sup>**

**ПОДЖАРСКАЯ**

**Марина Сергеевна<sup>2</sup>**

**ТРОФИМОВ**

**Алексей Андреевич<sup>3</sup>**

**СМАГИН**

**Денис Игоревич<sup>4</sup>**

### Сведения об авторах:

<sup>1</sup> техник, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), лаборатория №5, НИО-101, г. Москва, Россия, aa.chibizov@gmail.com

<sup>2</sup> техник, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), лаборатория №5, НИО-101, г. Москва, Россия, PodzharskayaMS@mai.ru

<sup>3</sup> инженер I категории, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), лаборатория №5, НИО-101, г. Москва, Россия, trofiteam@gmail.com

<sup>4</sup> начальник лаборатории №5, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), НИО-101, г. Москва, Россия, 796375877812@yandex.ru

### АННОТАЦИЯ

**Введение:** Стремительное развитие авиационной отрасли актуализирует вопрос совершенствования обеспечения безопасности полетов, в особенности для пассажирских авиаперевозок. В данной статье рассматривается вопрос повышения безопасности полетов пассажирских самолетов за счет использования системы контроля перекоса механизации крыла, а также нормативная база, регламентирующая процессы разработки и сертификации воздушных судов. В настоящее время при разработке подобных систем используются неавтоматизированные методы проектирования, не позволяющие достичь требуемых параметров системы с учетом сжатых сроков проектирования. **Цель исследования:** Целью исследования является повышение точности и быстродействия системы контроля перекоса секций механизации крыла, а также повышение скорости и качества проектирования системы контроля перекоса. **Методы:** В рамках данной работы предложена методика определения оптимальных параметров элементов системы контроля перекоса механизации крыла на основе индуктивных бесконтактных датчиков приближения, а именно геометрических размеров мишеней, за счет которых индуктивный датчик отслеживает перемещение элементов механизации крыла. Данная методика представлена в виде логической блок-схемы и может быть автоматизирована для повышения скорости и качества проектирования системы контроля перекоса. **Результаты:** Предложенная методика учитывает при расчете рабочий ход механизации, размеры чувствительного элемента датчика, параметры необходимые для формирования датчиком соответствующего сигнала, конструктивные особенности установки датчиков. Подобранные параметры позволяют отслеживать перекос каждой отдельно взятой секции механизации крыла с точностью до десятых градуса. За счет этого система контроля перекоса позволяет максимально быстро остановить работу механизации, что предотвращает возникновение значительных негативных моментов, поломку агрегатов, а также дает возможность своевременно уведомить пилота о неисправности летательного аппарата. **Практическая значимость:** практическая значимость предложенной методики заключается в ее универсальности и возможности использования для проектирования систем контроля перекоса на основе индуктивных бесконтактных датчиков приближения. **Обсуждение:** В дальнейшем данная методика может быть доработана с целью учета других параметров используемых датчиков и конструктивных ограничений.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** система контроля перекоса, механизация крыла, безопасность полета, математическая модель, авиационные правила, разработка систем самолета.

**Для цитирования:** Чибизов А.А., Поджарская М.С., Трофимов А.А., Смагин Д.И. Методика определения оптимальных характеристик реек системы контроля перекоса механизации крыла // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 4. С. 12-17. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-4-12-17

## Введение

В современном мире, в котором каждый день приходится преодолевать огромные расстояния, особое место отводится авиации. Она превосходит другие способы передвижения по скорости, безопасности и ряду других критериев, являясь важным компонентом экономической системы страны. [1] Самолеты должны отвечать требованиям как для полета на крейсерской скорости, так и для маневров на низкой скорости, таких как взлет и посадка [2].

В авиации на первое место выводится безопасность и экономическая целесообразность использования авиационной техники. Повышение глобальной безопасности гражданской авиации является одной из трех стратегических целей международной организации гражданской авиации (ИКАО)[3]. От инженеров-конструкторов летательных аппаратов требуется постоянное совершенствование систем управления, с целью обеспечения безопасности полетов и воздушного движения [4].

Для гарантированного обеспечения безопасности при разработке бортовых систем, необходимо учитывать выполнение всех требований документа «Авиационные правила – 25» [5], международных норм FAR-25 и CS-25 по обеспечению работоспособности, надежности и безопасности самолета [6-8]. В частности, раздела F пункта 25.1309(b) АП-25, в котором говорится, что разрабатываемая система должна быть спроектирована таким образом, чтобы любое катастрофическое отказное состояние было практически невероятно, а аварийное и сложное отказные состояния были маловероятны. Так же система должна обеспечивать аварийную сигнализацию для экипажа.

С целью повышения безопасности полетов и воздушного движения разрабатываются новые технологии, позволяющие контролировать все больше и больше параметров полета. Одним из таких параметров является положение механизации крыла относительно ее штатного состояния. В случае механического отказа системы управления механизации крыла возникает опасность перекоса одной или нескольких секций предкрылков или закрылков, что в свою очередь может привести к усложнению условий полета и возникновению катастрофической ситуации [9]. В случае несвоевременного предотвращения, перекос секции механизации может повлечь за собой разрушение конструктивных частей самолета, как это проиллюстрировано на рисунке 1.

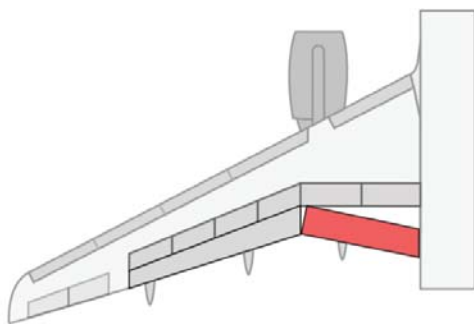


Рис. 1. Схематическое представление перекоса закрылка [10]

После проведения анализа документов по безопасности полетов гражданской авиации РФ за период с 2008 по 2015, был обнаружен случай возникновения перекоса механизации

крыла, произошедший в 2013 году в аэропорту Внуково на самолете Боинг-737-500. Эксперты Федерального агентства воздушного транспорта оценили данный инцидент как серьезный. Согласно АП 25 необходимо исключить возможность появления подобных ситуаций, для чего на самолеты должны устанавливаться системы, контролирующие возникновение перекоса. В случае невыполнения требований АП 25 не будет обеспечена требуемая безопасность полета, из-за чего самолет не пройдет сертификацию [11].

С целью предотвращения вышеописанной проблемы используется система контроля перекоса механизации крыла. Данные системы могут контролировать синхронное движение всех секций или какой-то одной секции.

Контроль синхронного движения механизации крыла может осуществляться

- за счет контроля длины трассы прокладки троса, [12, 13];
- за счет соединительной тяги, расположенной между соседними секциями механизации [14,15].

Один из вариантов реализации системы контроля отдельной секции механизации крыла может быть основан на использовании индуктивных бесконтактных датчиков приближения [16-19]. Особенность работы СКП заключается в том, что контролируется движение каждой отдельно взятой секции механизации (закрылка или предкрылка) по положению двух направляющих. С помощью датчиков определяется перекос секции, после чего выдается управляющий сигнал на остановку работы механизации.

Из-за необходимости подключения датчиков при помощи проводов предпочтительно их располагать на неподвижной части крыла, а рейку с метками на подвижной. Рассматриваемая в статье методика определения перекоса позволяет нивелировать подобные особенности размещения системы контроля перекоса.

Применение СКП позволяет исключить механические повреждения, которые могут возникнуть в случае перекоса, так как предложенная система позволяет предупредить и обеспечить движение механизации в пределах перекоса, недостаточного для повреждения.

## Предложенная методика

Основным параметром для определения качества СКП является то, как быстро она может определить перекос и на какой угол  $\gamma$  при этом произойдет отклонение от нормы. Определение угла  $\gamma$  изображено на рисунке 2.

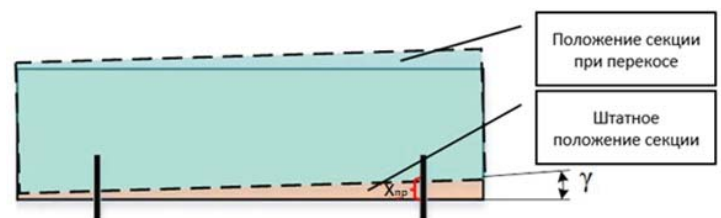


Рис. 2. Определение угла перекоса

Для достижения высокой точности требуется рассчитать геометрические параметры реек с метками, входящих в состав СКП так, чтобы сигнал об обнаружении перекоса был гарантированно сформирован. При этом скорость формирования сигнала должна быть максимальной и не должно возникать ложного сигнала рассогласования.

Для определения положения механизации крыла система контроля перекоса включает в себя рейку с метками и индуктивные датчики. Рейка с метками представляет собой металлическую полосу с сформированными на ней выступами (метками) и интервалами. Напротив реек размещаются индуктивные датчики приближения. С целью обеспечения отказоустойчивости для контроля каждой рейки используется пара датчиков, сигналы с которых повторяют друг друга с некоторым постоянным запаздыванием. Таким образом, для контроля положения одной секции используется 4 датчика. Во время работы механизации метки проходят напротив ДПИ, на которых формируется дискретный сигнал 0 или 1, обозначающий состояние «метка далеко» или «метка близко» соответственно.

Сигналы с датчиков одной секции механизации, должны быть попарно синхронны. Попарное сравнение сигналов подразумевает, что сравнение сигналов производится по каждому из каналов. То есть сначала сравнивается сигнал с первого датчика первой рейки с сигналом первого датчика, контролирующего вторую рейку – первый канал. Аналогично сравниваются сигналы со вторых (дублирующих) датчиков – второй канал. Подобный метод позволяет в случае отказа какого-либо из датчиков определить, в каком канале возникла проблема и исключить влияние неисправного датчика на определение перекоса секции.

Таким образом, сигнал о перекосе формируется в случае, если два сигнала с ДПИ одной рейки секции предкрылка или закрылка расходятся выше порогового значения с двумя датчиками, контролирующими вторую рейку той же секции предкрылка/закрылка.

При обнаружении перекоса, формируется и передается сигнал на остановку перемещения предкрылков или закрылков, трансляция удерживается в последнем достигнутом положении.

На каждой секции механизации крыла система контроля перекоса контролирует две направляющие. Так как их размеры могут отличаться в рамках одной конкретной секции, то и размеры реек требуется рассчитывать индивидуально для каждой направляющей. В связи с разной длиной реек возникает проблема подбора параметров меток, потому как датчики, расположенные на разных концах секции, должны синхронно проходить выступы и впадины. В случае, если в рамках одной секции рейки имеют разную длину, но одинаковые параметры выступов и впадин, один из счетчиков меток будет опережать другой, что приведет к определению ложного перекоса и дальнейшей остановке механизации.

При разработке данной системы требуется учитывать особенность работы индуктивного датчика, а именно перекрытие, при котором он срабатывает. Из-за физики процесса, для гарантированного снятия и установки сигнала необходимо подобрать выступы и впадины таким образом, обеспечивать перекрытие датчика равным 70%.

#### Методика определения параметров меток

Так как зачастую в зоне механизации крыла мало места, область установки датчиков может быть жестко ограничена, в связи с чем невозможно изменять расстояние между датчиками. Поэтому предлагаемая методика имеет разные вариации в зависимости от возможности изменения расстояния между датчиками.

Обобщенная методика предназначена для подбора параметров реек с метками в случае, если возможно изменять расстояние между датчиками. Алгоритм, описывающий обобщенную методику, приведен ниже.

#### 1. Первоначальный расчет рабочей области

Для расчета необходимо знать расстояние, на которое перемещается механизация. В случае закрылок:  $l = s$ , где  $s$  – ход закрылка,  $l$  – длина рабочей области. В случае предкрылок перемещение определяется по следующей формуле:

$$l = \frac{2\pi R}{360^\circ} \cdot \alpha, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – угол выпуска предкрылка,  $R$  – расстояние от оси вращения предкрылка до центра измерительной планки. Рабочая область рассчитывается соответственно для пары реек секции механизации крыла.

#### 2. Определение параметров меток

Геометрические параметры меток зависят от минимального диаметра датчиков, который определяется конструктивными требованиями СКП. Размер впадины должен быть больше 70% диаметра датчика для обеспечения гарантированного снятия сигнала с датчика. Так как два датчика должны в одно время выдавать одинаковый сигнал, расстояние между ними должно быть кратно длине периода рейки с метками (размер выступа + размер впадины).

Минимальный размер выступа также выбирается равным 70% от диаметра датчика.

3. Период рейки с метками  $T = l_m + l_b$ , где  $l_m$  – длина метки,  $l_b$  – длина впадины,  $T$  – период рейки с метками. Количество меток определяется исходя из формулы:

$$n = \frac{l}{T}, \quad (2)$$

где  $n$  – количество меток.

В случае, если  $n$  не является целым числом, количество полных периодов  $n$  определяется как целая часть от рассчитанного  $n$ . Оставшееся расстояние, равное  $l - nT$  закладывается в размер последней метки.

4. Отработка параметров меток в математической модели

Для корректной работы алгоритма определения перекоса количество периодов двух реек одной секции должно совпадать. Соответственно, выбирается минимальное  $n$  из рассчитанных в 3 пункте, исходя из этого определяются параметры меток на более длинной рейке. Соотношение между размерами выступов и впадин должно сохраняться на двух рейках, принадлежащих одной секции.

5. Расстояние между датчиками выбирается равным  $kT$ , где  $k$  – целое количество периодов. Общая длина рейки будет равна  $l + kT$ , соответственно  $kT < L - l$ , где  $L$  – конструктивная длина направляющей, на которую крепится рейка с метками.

6. Рассчитанные параметры заносятся в математическую модель. Для имитации работы реальных ДПИ в модели введена задержка переключения датчиков, поэтому при выборе максимального количества меток может накапливаться ошибка, возникновение которой может привести к ложному определению сигнала перекоса.

При возникновении ложного сигнала перекоса изменяются параметры меток. Если рассчитанное  $n$  больше выбранного, размеры меток увеличиваются до тех пор, пока позволяет запас, заложенный в последней метке. Если рас-

считанное  $n$  было целым, параметры меток изменяются за счет уменьшения количества периодов.

Подбирается несколько вариаций  $n$  и  $T$  для каждой секции, повторяется пункт 5, далее рассчитанные параметры заносятся в модель, с помощью которой выбираются оптимальные параметры меток. Для удобства все рассчитанные параметры меток и результаты моделирования сводятся в таблицу.

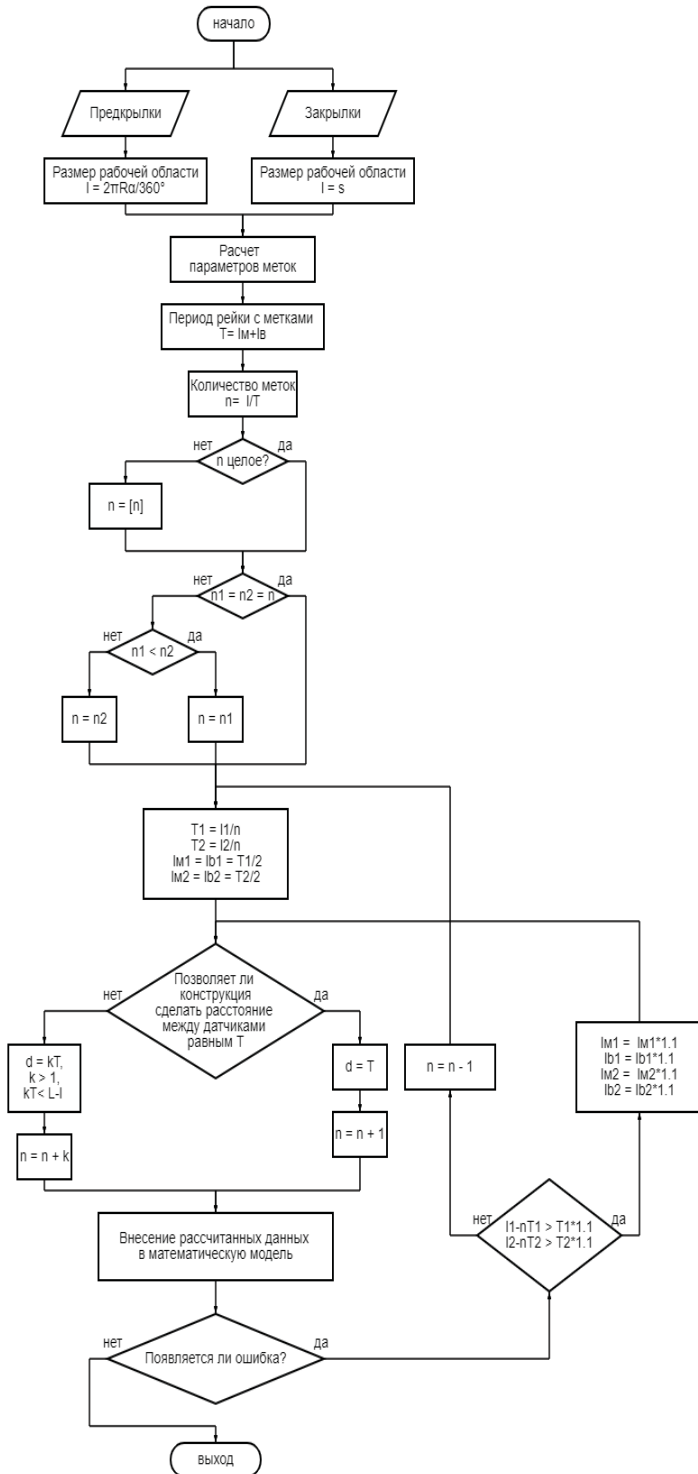


Рис. 3. Блок схема алгоритма подбора параметров меток

В случае, если ввиду конструктивных особенностей механизации крыла невозможно изменить расстояние между датчиками, из методики удаляется пятый пункт, а первый приобретает следующий вид:

1. Расстояние, на которое перемещается механизация, в случае закрылок будет определяться как  $l = s + d$ , где  $s$  – ход измерительной планки закрылка,  $d$  – расстояние между датчиками. В случае предкрылок перемещение будет определяться по следующей формуле:

$$l = \frac{2\pi R}{360^\circ} \cdot \alpha + d, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – угол хода измерительной планки предкрылка,  $R$  – расстояние от оси вращения предкрылка до измерительной планки. Рабочая область рассчитывается соответственно для пары реек секции механизации крыла.

Для оптимальной работы системы необходимо, чтобы датчики синхронно проходили метки, поэтому при проектировании системы должно учитываться следующее условие:

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{T_1}{T_2} = \frac{d_1}{d_2}, \quad (4)$$

где  $l_1, T_1$  – длина рабочей части, период первой рейки,  $l_2, T_2$  – длина рабочей части, период второй рейки,  $d_1$  – расстояние между датчиками, относящимися к первой рейке,  $d_2$  – расстояние между датчиками, относящимися к первой рейке.

При фиксированном расстоянии между датчиками данное условие может не выполняться, что приводит к возникновению ошибки, которая может повлечь возникновение ложного сигнала перекоса. В данном случае полностью исключить появление ошибки невозможно, но проведение математического моделирования позволяет свести ее к минимуму. Таким образом, из таблицы, составленной в пункте 6, выбираются параметры меток, приводящие к возникновению минимальной систематической ошибки.

По мере роста объема и сложности проектов разработчики все чаще используют в процессе проектирования вычислительную технику [20]. Для повышения скорости и качества проектирования системы контроля перекоса представленная выше методика может быть автоматизирована. Алгоритм определения параметров меток при условии равенства выступов и впадин и возможности изменения расстояния между датчиками на рисунке 3.

## Заключение

Предложенная методика, с использованием математической модели, значительно повышает точность вычислений параметров меток, тем самым увеличивая скорость обнаружения перекоса системы контроля перекоса. Подобранные параметры позволяют отслеживать перекос каждой отдельно взятой секции механизации крыла с точностью до десятых градуса. За счет этого СКП позволяет максимально быстро остановить работу механизации, что предотвращает возникновение значительных негативных моментов, поломку агрегатов, а также дает возможность своевременно уведомить пилота о неисправности летательного аппарата. В дальнейшем, данная методика может быть доработана с целью учета других параметров используемых датчиков и конструктивных ограничений.

## Литература

1. Хусаинов И.Р. Безопасность полетов и авиационная безопасность // Синергия наук. 2017. № 15. С. 344-349.
2. Zaccai D., Bertels F., Vo R. Design methodology for trailing-edge high-lift mechanisms // CEAS Aeronaut Journal. 2016. No. 7. Pp. 521–534. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13272-016-0202-7>
3. Фасхеева Ф.Р. Проблемы и перспективы обеспечения безопасности гражданской авиации // Сборник статей Международной научно-практической конференции «Современные Технологии В Мировом Научном Пространстве» (Пермь, 25 мая 2017 г.). Уфа: Аэтерна, 2017. Ч. 5. С. 232-233.
4. Хажиахметова Е.Ш. Уровни управления и основные функции бортовой комплексной системы обеспечения безопасности полета // Сборник статей Международной научно-практической конференции «Новая наука как результат инновационного развития общества» (Сургут, 22 апреля 2017 г.). Уфа: Агентство международных исследований, 2017. С. 194-196.
5. Павлов А.А. Методика формирования требований к эксплуатационной документации беспилотных авиационных систем в гражданской авиации // Научный Вестник ГосНИИ ГА. 2018. № 23. С. 75-83.
6. Постников С.Е., Трофимов А.А., Смагин Д.И. Варианты архитектур системы управления для ближне-среднемагистрального самолета // Инженерный журнал: Наука и инновации. 2017. № 12(72). 13 с. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-12-1711
7. Лесничий И.В., Самойлов И.А., Страдомский О.Ю. Мировые системы сертификации авиационной техники // Научный Вестник ГосНИИ ГА. 2017. № 16(327). С. 16-26.
8. Елисов Л.Н., Филиппов В.Л., Овченков Н.И., Мусин С.М. К вопросу о теории авиационной безопасности // Научный Вестник ГосНИИ ГА. 2019. № 27. С. 109-119.
9. Седнев В.А. Оценка классификации и сценариев развития авиационных происшествий // Технологии техносферной безопасности. 2020. № 3(89). С. 86-97. DOI: 10.25257/TTS.2020.3.89.86-97
10. Lerch M., Thielecke F. Concepts for a safety device in conventional track-linkage kinematics to prevent skew in a single flap system // Der 66. Deutsche Luft- und Raumfahrtkongress (München, 5-7 September 2017). Lilienthal-Oberth e.V., Bonn, 2017. 10 p. URL:<https://www.dglr.de/publikationen/2017/450068.pdf> (дата обращения 15.07.2021).
11. Кошаташян А.О. Сертификация гражданских самолетов // Сборник тезисов докладов XLIV Международной молодежной научной конференции «XLIV Гагаринские Чтения – 2018» (Москва-Ахтубинск-Байконур, 17-20 апреля 2018 г.). Москва: Изд-во Московского авиационного института (национальный исследовательский университет), 2018. Т. 4. С. 196-197.
12. Патент РФ 2475423С2. Устройство контроля за синхронностью закрылков самолетного крыла / Шифельбуш Б. Заявл. 17.04.2008. Оpubл. 20.02.2013. Бюл. № 30. 12 с.
13. Патент РФ 2489324С2. Сенсорная система для контроля синхронного хода рулевых поверхностей самолета / Шлегель Р., Рих Ю. Заявл. 29.09.2008. Оpubл. 10.08.2013. Бюл. № 22. 16 с.
14. Patent US 8469165 B2 Interconnecting strut for arranging between adjacent landing flaps of an aircraft / Versluis S. Declared 27.04.2007. Published 15.11.2007. Bulletin No. 60/797,331. 10 p.
15. Patent US 6483436B1 Method and apparatus for sensing skews and disconnects of adjacent movable components / Emaci E., Wilkinson S., Leden W. Declared 21.05.2001. Published 19.11.2002. Bulletin No. 09/862,066. 11 p.
16. Patent US 2015/0159988 A1. Control surface skew detection systems / Magdi A. Essawy. Declared 14.02.2014. Published 11.06.2015. Bulletin No. 14/180,997. 9 p.
17. Патент РФ 262 7259 C2 Устройство обнаружения и предотвращения перекоса закрылка / Джамгаров С.Г., Орлов В.Н., Литвиненко А.И., Бирюков К.В. Заявл. 084.0.2017. Оpubл. 10.08.2013. Бюл. № 16. 13 с.
18. Patent US 5680124A Skew and loss detection system for adjacent high lift devices / Bedell J.C., Berta W.M. Declared 15.05.1995. Published 21.10.1997. Bulletin No. 442,208. 14 p.
19. Patent US 5686907A Skew and loss detection system for adjacent high lift devices / Bedell J.C., Berta W.M. Declared 15.05.1995. Published 11.11.1997. Bulletin No. 441,555. p. 14.
20. Anderson D. A Design Process for Design Automation: Thesis for the degree of Doctor of Philosophy. 2018. 136 p.

## THE METHOD OF DETERMINING THE OPTIMAL CHARACTERISTICS OF THE RAILS OF THE WING MECHANIZATION SKEW CONTROL SYSTEM

**ALEXANDER A. CHIBIZOV**

Moscow, Russia, aa.chibizov@gmail.com

**MARINA S. PODZHARSKAYA** Moscow,

Russia, PodzharskayaMS@mai.ru

**ALEXEY A. TROFIMOV**

Moscow, Russia, trofiteam@gmail.com

**DENIS I. SMAGIN**

796375877812@yandex.ru

### ABSTRACT

**Introduction:** The rapid development of the aviation industry is raising the issue of improving flight safety, especially for passenger air transportation. This article discusses the issue of improving the flight safety of passenger aircraft through the use of a skew control system for wing mechanization, as well as the regulatory framework governing the development and certification of aircraft. Currently, in the development of such systems, non-automated design methods are used, which do not allow achieving the required parameters of the system, taking into account the tight design time. **Purpose:** The pur-

**KEYWORDS:** skew control system, wing mechanization, flight safety, mathematical model, aviation regulations, development of aircraft systems.

pose of the study is to improve the accuracy and speed of the skew control system of the wing sections, as well as to increase the speed and quality of the skew control system design. **Methods:** Within the framework of this work, a method is proposed for determining the optimal parameters of the elements of the skew control system of the wing mechanization based on inductive proximity sensors, namely the geometric dimensions of the targets, due to which an inductive sensor monitors the movement of the wing mechanization elements. This technique is presented in the form of a logical block diagram and can be automated to increase the speed and quality of the skew con-



trol system design. **Results:** The proposed method takes into account when calculating the working stroke of mechanization, the dimensions of the sensor's sensitive element, the parameters necessary for the formation of the corresponding signal by the sensor, and the design features of the sensor installation. The selected parameters allow tracking the skew of each individual wing high-lift section with an accuracy of tenths of a degree. Due to this, the skew control system allows the mechanization to be stopped as quickly as possi-

ble, which prevents the occurrence of significant negative moments, breakdowns of the units, and also makes it possible to promptly notify the pilot about aircraft malfunctions. **Practical relevance:** the practical significance of the proposed method lies in its versatility and the possibility of using it for designing skew control systems based on inductive proximity sensors. **Discussion:** In the future, this technique can be improved to take into account other parameters of the sensors used and design constraints.

## REFERENCES

1. Khusainov I.R. Safety of flights and aviation safety. *Sinergiya Nauk* [Synergy of Sciences]. 2017. No. 15. P. 344-349. (In Rus)
2. Zaccai D., Bertels F., Vo R. Design methodology for trailing-edge high-lift mechanisms. *CEAS Aeronaut Journal*. 2016. No. 7. P. 521-534. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13272-016-0202-7>
3. Fashieva F.R. Problems and prospects of ensuring the safety of civil aviation. *Sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Sovremennye Tekhnologii V Mirovom Nauchnom Prostranstve"* [Proc. of the International scientific and Practical Conference "Modern Technologies In the World Scientific Space", Perm, May 25, 2017]. Ufa, Aeterna, 2017. Pt. 5. P. 232-233. (In Rus)
4. Khazhiakhmetova E.S. Control levels and main functions of the on-board integrated flight safety system. *Sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Novaya nauka kak rezul'tat innovatsionnogo razvitiya obshchestva"* [Proc. of the International scientific and Practical Conference "New science as a result of innovative development of society", Surgut, April 22, 2017]. Ufa, Agentstvo mezhdunarodnykh issledovaniy, 2017. Pt. 10. P. 194-196. (In Rus)
5. Pavlov A.A. Methodology for forming of requirements to the operational documentation of unmanned aircraft systems in civil aviation. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*. 2018. No. 23. P. 75-83. (In Rus)
6. Postnikov S.E., Trofimov A.A., Smagin D.I. Options of control system architectures for short-medium haul aircraft. *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2017. No.12 (72). 13 p. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-12-1711 (In Rus)
7. Forester I.V., Samoilov I.A., Stradomsky O.Yu. Aircraft certification system in the world. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*. 2017. No. 16(327). P. 16-26. (In Rus)
8. Elisov L.N., Filipov V.L., Ovchinnikov N.I., Musin S. M. To the question about the theory of aviation safety. *Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*. 2019. No. 27. P. 109-119. (In Rus)
9. Sednev V.A. Assessment of classification and development scenarios of aviation accidents. *Technology of technosphere safety*. 2020. No. 3(89). P. 86-97. DOI: 10.25257/TTS.2020.3.89.86-97 (In Rus)
10. M. Lerch, F. Tileke Concepts of a safety device in the traditional kinematics of tracked traction to prevent misalignment in a single flap system. Der 66. Deutsche Luft- und Raumfahrtkongress, Munchen, 5-7 September 2017. Lilienthal-Oberth e.V., Bonn, 2017. 10 p. URL: <https://www.dglr.de/publikationen/2017/450068.pdf> (date of access 15.07.2021). (In Rus)
11. Koshatashyan A.O. Certification of civil aircraft. *Abstracts of reports of the XLIV Gagarin Science Conference*, Moscow-Akhtubinsk-Baikonur, April 17-20, 2018. Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University) Publ., 2018. Vol. 4. P. 196-197. (In Rus)
12. Patent RF 2475423C2. Device to control aircraft wing flap synchronism. Shifel'bush B. Declared 17.04.2008. Published 20.02.2013. Bulletin No. 30. 12 p. (In Rus)
13. Patent RF 2489324C2. Sensory system for control over aircraft steering surfaces timed operation. Shlegel' R., Rikh Yu. Declared. 29.09.2008. Published. 10.08.2013. Bulletin No. 22. 16 p. (In Rus)
14. Patent US 8469165 B2 Interconnecting strut for arranging between adjacent landing flaps of an aircraft. Versluis S. Declared 27.04.2007. Published 15.11.2007. Bulletin No. 60/797,331. 10 p.
15. Patent US 6483436B1 Method and apparatus for sensing skews and disconnects of adjacent movable components. Emaci E., Wilkinson S., Leden W. Declared 21.05.2001. Published 19.11.2002. Bulletin No. 09/862,066. 11 p.
16. Patent US 2015/0159988 Control surfaceskew detection systems. Magdi A. Essawy Declared 14.02.2014. Published 11.06.2015. Bulletin No. 14/180,997. p. 9.
17. Patent RF 2627259 C2. Device for detection and prevention of swash of trailing-edge flaps. Dzhamgarov S.G., Orlov V.N., Litvinenko A.I., Biryukov K.V. Declared. 084.0.2017. Published. 10.08.2013. Bulletin No. 16. 13 p. (In Rus)
18. Patent US 5680124A Skew and loss detection system for adjacent high lift devices / Bedell J.C., Berta W.M. Declared 15.05.1995. Published 21.10.1997. Bulletin No. 442,208. 14 p.
19. Patent US 5686907A Skew and loss detection system for adjacent high lift devices / Jeffrey C. Bedell, Wayne M. Berta, Declared 15.05.1995. Published 11.11.1997. Bulletin No. 441,555. p. 14.
20. Anderson D. A Design Process for Design Automation: Thesis for the degree of Doctor of Philosophy. 2018. 136 p.

## INFORMATION ABOUT AUTHORS:

**Alexander Alexandrovich Chibizov**, technician, Moscow Aviation Institute (National Research University), Laboratory No. 5, RO-101, Moscow, Russia, [aa.chibizov@gmail.com](mailto:aa.chibizov@gmail.com)

**Marina Sergeevna Podzharskaya**, technician, Moscow Aviation Institute (National Research University), Laboratory No. 5, RO-101, Moscow, Russia, [PodzharskayaMS@mai.ru](mailto:PodzharskayaMS@mai.ru)

**Alexey Andreevich Trofimov**, engineer of the I category, Moscow Aviation Institute (National Research University), Laboratory No. 5, RO-101, Moscow, Russia, [trofiteam@gmail.com](mailto:trofiteam@gmail.com)

**Denis Igorevich Smsgin**, Head of Laboratory No. 5, Moscow Aviation Institute (National Research University), RO-101, Moscow, Russia, [796375877812@yandex.ru](mailto:796375877812@yandex.ru)

**For citation:** Chibizov A. A., Podzharskaya M. S., Trofimov A. A., Smagin D. I. The method of determining the optimal characteristics of the rails of the wing mechanization skew control system. *H&ES Reserch*. 2021. Vol. 13. No. No 4. P. 12-17. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-4-12-17 (In Russian)

doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-4-18-28

# РАСЧЕТ СВОЕВРЕМЕННОСТИ ПЕРЕДАЧИ ЗАПРОСА В РЕЖИМЕ ДВОЙНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАНАЛА СИГНАЛИЗАЦИИ

**КОСЯК**

**Александр Иванович<sup>1</sup>**

**ДОНЦОВ**

**Дмитрий Вячеславович<sup>2</sup>**

**ЯКИМОВА**

**Ирина Андреевна<sup>3</sup>**

## АННОТАЦИЯ

**Введение:** показано, что при организации сбора коротких цифровых сообщений в транкинговой сети радиосвязи могут быть использованы служебные запросные каналы связи, передающие пакеты-запросы на установление соединения. При данном подходе возникает вопрос о размере пропускной способности запросного канала связи, выделяемой для сбора информации, при которой выполнение требований по установлению соединения будет сохранено. **Цель исследования:** целью работы является построение методики расчета своевременности передачи запросов на установление соединения в условиях передачи коротких цифровых сообщений. Указанная методика является основой методики определения пропускной способности запросного канала связи, выделяемой для решения задачи по сбору коротких цифровых сообщений. **Результаты:** Проведено математическое описание выявленной особенности, в чем и состоит научная новизна результатов исследования. Представлено аналитическое правило расчета матрицы переходных вероятностей и порядок расчета вектора начальных вероятностей процесса передачи запроса, позволяющие на основе уравнения Колмогорова-Чепмена математически описать процесс передачи запроса на основе алгоритма случайного множественного доступа и провести расчет вероятностно-временной характеристики передачи запроса. Представлена методика расчета вероятностно-временной характеристики передачи запроса на основе составленной математической модели функционирования запросного канала. Показан эффект от учета выявленных особенностей выраженный в увеличении своевременности передачи запроса. **Практическая значимость:** Сформирована методика, являющаяся основой методики определения оптимальных значений параметров двойного использования запросного канала, позволяющая организовать передачу по запросному каналу детерминированного трафика коротких цифровых сообщений с заданным уровнем своевременности передачи запросов на установление соединения. **Обсуждение:** применение сформированной методики позволит организовать в транкинговой сети радиодоступа периодический сбор коротких цифровых сообщений без использования каналов трафиков.

## Сведения об авторах:

<sup>1</sup>к.т.н., старший научный сотрудник управления АСУ и Связи МОУ "Институт инженерной физики", г. Серпухов, Россия, kosyakai@iifmail.ru

<sup>2</sup>соискатель МОУ "Институт инженерной физики", г. Серпухов, Россия, info@iifmail.ru

<sup>3</sup>к.т.н., старший преподаватель кафедры механики и инженерной графики филиала ВА им. Петра Великого, г. Серпухов, Россия, zelenoglazka1989@mail.ru

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** транкинговые системы радиосвязи, передача запроса, неадаптивный тактированный случайный множественный доступ, запросный канал связи, поглощающая конечная марковская цепь.

**Для цитирования:** Косяк А. И., Донцов Д. В., Якимова И. А. Расчет своевременности передачи запроса в режиме двойного использования канала сигнализации // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 4. С. 18-28. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-4-18-28

### Введение

Альтернативным вариантом при организации сбора коротких цифровых сообщений (далее *донесений*) в транкинговой сети радиодоступа является сбор по служебному каналу связи (каналу сигнализации (КС)), передающему *запросы* на установление соединения. Особенность канал сигнализации состоит в том, что ввиду природы трафика, передача запросов осуществляется по алгоритму случайного множественного доступа (СМД) [1, 2].

Известен ряд работ [3-7], в которых рассматривается организация приоритетного доступа абонентов к широкополосному каналу, принадлежащих разнородным группам абонентов в режиме динамического СМД, вводятся механизмы управления СМД для поддержания заданного распределения пропускной способностью. Отличие рассматриваемой задачи от представленных решений состоит в том, что трафик донесений может быть преобразован в детерминированный, использование для передачи которого СМД, заведомо является неэффективным. Именно поэтому в [8] описан подход к двойному использованию КС, состоящий в попеременном использовании КС для передачи запросов и донесений. Объем пропускной способности, выделяемой для передачи запросов, определяется коэффициентом целевого использования канала сигнализации. Ясно, что чем меньше пропускной способности выделяется для передачи запросов, тем больше пропускной способности выделяется для передачи донесений. Выполнение целевых задач КС характеризуется своевременностью передачи запроса на установление соединения, а именно, вероятностью передачи запроса ( $P_3^{mp}$ ) за время не более заданного ( $T_3^{don}$ ) (вероятностно-временной характеристикой (ВВХ)). Требования по передаче запросов на установление соединения определены и закреплены в ряде регламентирующих документов. Возникает вопрос, какое максимальное значение пропускной способности может быть выделено для сбора донесений при сохранении выполнения требований по своевременности передачи запроса на установление соединения?

### Анализ работы канала сигнализации в режиме двойного использования

В [8] представлена математическая модель (ММ) функционирования КС в режиме двойного использования, позволяющая провести оптимизацию параметра алгоритма СМД и получить значения основных показателей работы алгоритма: средней задержки и пропускной способности. Однако для оценки ВВХ передачи запроса требуется составление дополнительной ММ передачи запроса по КС [9, 10, 11].

Для математического описания исследуемого процесса введен ряд пояснений:

1. При передаче запроса используется схема с обратным квитированием.
2. Передача запроса осуществляется по каналу сигнализации по алгоритму тактированного случайного множественного доступа, имеющего один параметр, именуемый «вероятностью повторной передачи запроса».
3. МА, ввиду особенностей алгоритма СМД могут находиться в состоянии либо первичной, либо повторной передачи.

4. Поток заявок принимается простейшим и характеризуется первичной интенсивностью генерации запросов  $\lambda_0$  (вызов/с) [12].

Исследуемый процесс передачи запроса является:

- случайным - ввиду случайной природы порождения запросов и содержания алгоритма СМД;
- дискретным – ввиду кадровой схемы организации канала.

Относительно передачи запросов работа КС в режиме двойного использования характеризуется «простоем», когда передаются донесения (на длительности  $l_d$  слот) и «работой», когда передаются запросы (на длительности  $l_z$  слот). Частота «простоя» и «работы» характеризуется коэффициентом целевого использования КС ( $K_{ц.и.}$ ). На этапе «работы», когда передаются запросы можно выделить два типа шагов, характеризующихся разной длительностью, в течении которой проводилась генерация запросов с первичной интенсивностью  $\lambda_0$ . Приведенная особенность наглядно иллюстрируется на временной диаграмме, представленной на рисунке 1.

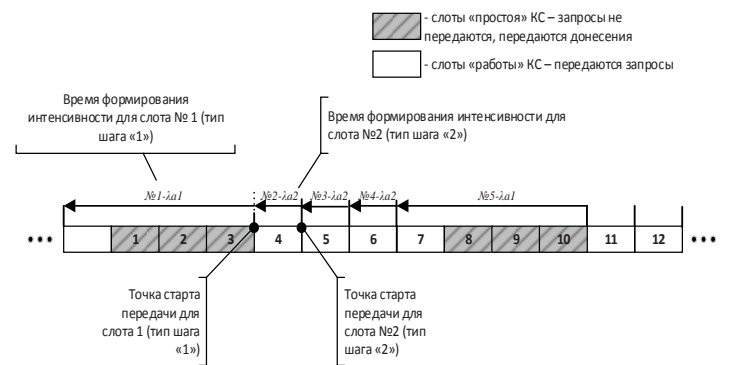


Рис. 1. Временная диаграмма, поясняющая формирование интенсивности генерации запросов для каждого из шагов передачи запросов в режиме двойного использования КС

На рисунке изображены кадры, представляющие собой шаги переходов исследуемого процесса, пронумерованные с момента начала режима двойного использования КС.

Из представленного рисунка видно, что в момент начала четвертого порядкового слота, соответствующего КС передачу начнут МА, сгенерировавшие запросы в течении прошлого кадра передачи запросов (соответствующего последнему слоту монопольного использования КС) и кадров, в течении которых в слотах КС проводилась передача донесений (порядковый слот №1, 2 и 3). Такая же ситуация характерна и для слота с номером 11. В слоте №11 будут переданы запросы, сгенерированные в течении 7-го, 9-го, 9-го и 10-го кадров. В момент начала 5-го, 6-го, 7-го, 12-го слота и т.д. будут первично передаваться запросы, сгенерированные на длительности предшествующего кадра.

Таким образом, имеют место быть два типа шагов передачи запросов с разными интервалами генерации запросов, а соответственно разными интенсивностями генерации запросов:

$$\Delta\tau = \{\Delta\tau_1, \Delta\tau_2\}, \quad (1)$$

где  $\Delta\tau_1, \Delta\tau_2$  – длительность генерации запроса для шага первого и второго типа соответственно.

Длительность генерации запроса для шага переходов передачи запросов первого типа определяется на основе следующего аналитического выражения:

$$\Delta\tau_1 = (l_0 + 1)\tau_{\text{кадр}}, \quad (2)$$

где  $\tau_{\text{кадр}}$  – размер кадра.

Длительность генерации запроса для шага переходов передачи запросов второго типа равна длине кадра:

$$\Delta\tau_2 = \tau_{\text{кадр}}. \quad (3)$$

Расчет интенсивностей генерации запросов на кадр для каждого из типов шагов проводится на основе аналитических выражений, приведенных ниже:

$$\lambda_{a1} = \lambda_0 \Delta\tau_1, \quad (4)$$

$$\lambda_{a2} = \lambda_0 \Delta\tau_2, \quad (5)$$

где  $\lambda_{a1}, \lambda_{a2}$  – интенсивности генерации запросов для шагов передачи запросов соответственно первого и второго типа.

Разделение шага на два типа, для каждого из которых характерны свои интенсивности генерации запросов, приводит к появлению соответствующих двух вероятностей генерации запроса:

$$q_{a1} = 1 - e^{-\lambda_{a1}}, \quad (6)$$

$$q_{a2} = 1 - e^{-\lambda_{a2}}, \quad (7)$$

где  $q_{a1}$  – вероятность первичной генерации запроса на шаге типа «1»,  $q_{a2}$  – вероятность первичной генерации запроса на шаге типа «2».

Временная диаграмма, поясняющая порядок следования разных типов шагов исследуемого процесса приведена на рисунке 2.

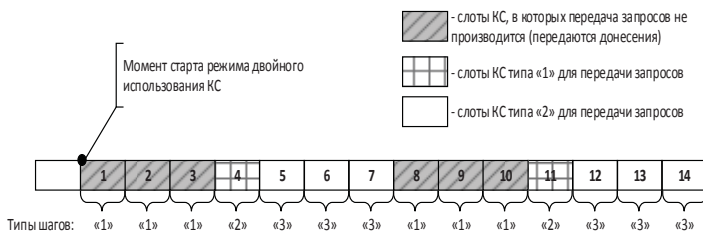


Рис. 2. Временная диаграмма смены типа шагов передачи запросов при двойном использовании КС ( $l_3=3, l_0=4$ )

Исходя из логики следования шагов ясно, что на периоде двойного использования КС ( $L$ ) число шагов типа «1» будет равно одному ( $n_{u1}=1$ ), а число шагов типа «2» будет равно:

$$n_{u2} = l_3 - 1. \quad (8)$$

Общее число шагов передачи запросов разного типа на периоде  $L$  будет равно:

$$n_{uu} = n_{u1} + n_{u2}. \quad (9)$$

Ввиду стохастичности моделируемого процесса перейдем к вероятностному описанию порядка следования типов шагов. Вероятность возникновения шага передачи запроса типа «1» ( $P_{u1}$ ) на периоде двойного использования КС в течение  $l_3$  слот КС будет определяться выражением:

$$P_{u1} = n_{u1} / n_{uu}. \quad (10)$$

Вероятность шага «2»:

$$P_{u2} = n_{u2} / n_{uu}. \quad (11)$$

### Математическая модель передачи запроса

Для описания процесса передачи запроса по алгоритму СМД подходит аппарат поглощающих конечных марковских цепей (ПКМЦ) [9, 10, 11, 13, 14]. Моделирование процесса начинается с момента генерации искомым абонентом запроса и завершается при успешной передаче. Запрос может быть передан на первом шаге моделирования, то есть из режима первичной передачи, либо на последующих шагах из режима повторной передачи. В соответствии с выбранной стратегией [8] в случае в момент генерации запроса КС будет использоваться для передачи донесений, мобильный абонент (МА) перейдет в режим повторной передачи.

Состояние процесса передачи запроса можно охарактеризовать одним индексом:

$$s \in \{1, \dots, W\}, \quad (12)$$

где  $W$  – общее число состояний, определяемое на основе аналитического соотношения, представленного ниже:

$$W = 2N + 1, \quad (13)$$

где  $N$  – общее число МА, участвующих в передаче запросов на установление соединения.

Синтезированный граф переходов ПКМЦ передачи запроса по алгоритму СМД в режиме двойного использования КС представлен на рисунке ниже.

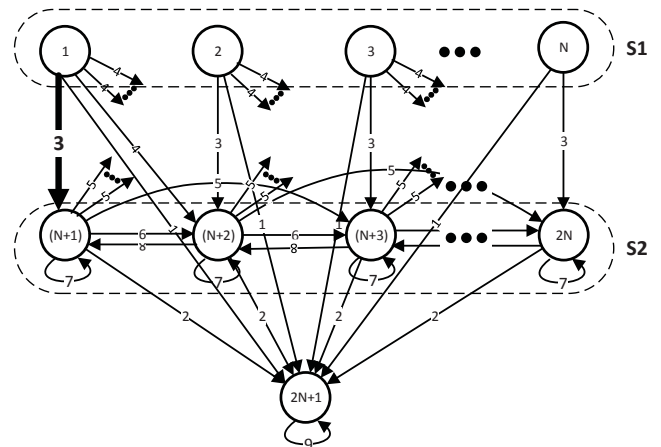


Рис. 3. Граф переходов ПКМЦ передачи запроса по алгоритму СМД в режиме двойного использования КС

Все множество состояний, не считая поглощающего можно разделить на два множества:

– множество  $S1=\{1... N\}$ , состоящее из состояний, в которых искомый абонент сгенерировал запрос и находится в режиме первичной передачи;

– множество  $S2=\{N+1... 2N\}$ , состоящее из состояний, в которых мобильные абоненты, в том числе и искомый находятся в режиме повторной передачи.

Состоянию «1» соответствует 0 абонентов, находящихся в режиме повторной передачи запроса на установление соединения и (N-1) абонентов, находящихся в режиме первичной генерации запроса в условиях, когда искомый абонент сгенерировал пакет и на следующем шаге его передаст, перейдя в режим первичной генерации, состоянию «2» соответствует 1 абонент находящийся в режиме повторной передачи запроса на установление соединения и (N-2) абонентов, находящихся в режиме первичной генерации запроса в условиях, когда искомый абонент сгенерировал пакет и на следующем шаге его передаст, перейдя в режим первичной генерации и т.д. Состоянию «N+1» соответствует 1 абонент (рассматриваемый абонент), находящийся в режиме повторной передачи запроса на установление соединения и (N-1) абонентов, находящихся в режиме первичной генерации пакета. Состоянию «N+2» соответствует 2 абонента (один из которых - рассматриваемый абонент), находящихся в режиме повторной передачи запроса на установление соединения и (N-2) абонентов- в режиме первичной генерации запроса. Состояние «2N» описывает случай, когда все абоненты (N-абонентов, в том числе и рассматриваемый абонент) находятся в режиме повторной передачи пакета. Поглощающее состояние «2N+1» соответствует успешной передаче запроса на установление соединения выбранным абонентом.

Процесс моделирования начинается с того момента, когда рассматриваемый абонент сгенерировал запрос на установление соединения, то есть когда он находится в режиме первичной передачи. То есть в начальный момент времени процесс находится в одном из состояний множества  $S1$ . Если рассматриваемый абонент, находясь в режиме первичной передачи пакет не передал, то процесс переходит в одно из состояний множества  $S2$ , а сам абонент переходит в режим повторной передачи. В случае успешной передачи процесс переходит в поглощающее состояние  $S_W$ .

Для описания событий, сопровождающих смену состояний рассматриваемого процесса рассмотрим элементарные события, возникающие в процессе передачи запроса по КС.

Рассмотрим событие, состоящее в генерации  $i$ -м числом МА запросов, находящихся в режиме первичной генерации, при этом число МА, находящихся в режиме повторной передачи равно  $n$ . Данное событие возможно тогда и только тогда, когда  $i$  МА, из  $(N-n)$ , находящихся в режиме первичной генерации сгенерируют запрос, а остальные  $(N-n-i)$  МА, находящихся в режиме первичной генерации запрос не сгенерируют. Рассмотренные события генерации и не генерации запросов заданным числом МА являются независимыми. Вероятность того, что  $i$  МА сгенерируют запрос равна  $q_a$ . Вероятность того, что  $(N-n-i)$  не сгенерируют запрос, равна  $(1-q_a)^{N-n-i}$ . Пользуясь теоремой произведения независимых событий и правилом комбинаторики, вероятность первичной генерации  $i$ -ым числом МА запросов, в условиях, когда  $n$

МА находятся в режиме повторной передачи равна: для шага «1»:

$$Q_{a1}(i, n) = C_i^{N-n} (1 - q_{a1})^{N-n-i} q_{a1}^i \quad (14)$$

где  $C_i^j$  – биномиальный коэффициент [15], представляющий собой число сочетаний из  $i$  по  $j$  и определяемый выражением

$$C_i^j = \begin{cases} \frac{i!}{j!(i-j)!} & \text{для } j \leq i \\ 0 & \text{для } j > i \end{cases}$$

Для шага «2»:

$$Q_{a2}(i, n) = C_i^{N-n} (1 - q_{a2})^{N-n-i} q_{a2}^i, \quad (15)$$

Рассмотрим событие, при котором  $i$  МА, находящиеся в режиме повторной передачи передадут запроса в КС. Данное событие возможно, когда  $i$  из  $n$  МА, находящихся в режиме повторной передачи передадут пакет в КС, а остальные  $(n-i)$  МА передавать пакет в КС не будут. По подобию рассмотренного события выше, вероятность данного события будет равна:

$$Q_r(i, n) = C_i^n (1 - q_r)^{n-i} q_r^i. \quad (16)$$

Логику переходов нагляднее всего описывать в терминах событий. События, используемые для описания логики переходов, а также их вероятностные меры приведены в таблице ниже.

Таблица 1

Перечень событий процесса передачи запроса

Обозначение события	Описание	Вероятность
$C_s$	Наступление слота для передачи запроса (любого типа)	$K_{у.в.}$
$C_{s1}$	Наступление слота для передачи запроса, относящегося к первому типу	$P_{ш1}$
$C_{s2}$	Наступление слота для передачи запроса, относящегося к второму типу	$P_{ш2}$
$C_d$	Наступление слота для передачи донесения	$(1 - K_{у.в.})$
$A_1(0)$	Никто из МА, находящихся в режиме первичной генерации на длительности шага первого типа не сгенерировал запрос	$Q_{a1}(0, n)$
$A_2(0)$	Никто из МА, находящихся в режиме первичной генерации на длительности шага второго типа не сгенерировал запрос	$Q_{a2}(0, n)$
$A_1(\bar{0})$	Один или более МА, находящихся в режиме первичной генерации на длительности шага первого типа сгенерировали запрос и передал его в КС	$(1 - Q_{a1}(0, n))$
$A_2(\bar{0})$	Один или более МА, находящихся в режиме первичной генерации на длительности шага второго типа сгенерировали запрос и передал его в КС	$(1 - Q_{a2}(0, n))$
$A_1(i)$	$i$ МА, находящихся в режиме первичной генерации на длительности шага первого типа сгенерировали запрос и передал его в КС	$Q_{a1}(i, n)$
$A_2(i)$	$i$ МА, находящихся в режиме первичной генерации на длительности шага второго типа сгенерировали запрос и передал его в КС	$Q_{a2}(i, n)$

$R(0)$	Никто из МА, находящихся в режиме повторной передачи не передал (выдал) запрос в КС	$Q_r(0, n)$
$\bar{R}(0)$	Один или более МА, находящихся в режиме повторной передачи передали запрос в КС	$(1 - Q_r(0, n))$
$R(i)$	$i$ МА, находящихся в режиме повторной передачи передали запрос в КС	$Q_r(i, n)$
$R_{A6}$	Передача запроса искомым абонентам, находящимся в режиме повторной передачи	$1/n$
$\bar{R}_{A6}$	Отсутствие передачи запроса искомым абонентом, находящимся в режиме повторной передачи	$(n-1)/n$

Пояснение логики переходов в терминах введенных событий представлено в таблице ниже.

Таблица 2

Условия изменения состояния процесса передачи запроса

№ перехода	Условие перехода	События
<b>Переход из множества S1 в поглощающее</b>		
1	$(i = W - s) \wedge (1 \leq s \leq N)$	$C_3 \wedge A(0) \wedge R(0)$
<b>Переход из множества S2 в поглощающее</b>		
2	$(i = W - s) \wedge ((N+1) \leq s \leq 2N)$	$C_3 \wedge A(0) \wedge R(1) \wedge R_{A6}$
<b>Переход из S1 в S2</b>		
3.	$(i = N) \wedge (1 \leq s \leq N)$	$A(0) \wedge (C_3 \wedge R(\bar{0}) \vee C_0)$
4	$((N+1) \leq i \leq (2N-s)) \wedge (1 \leq s \leq N)$	$C_3 \wedge (C_{31} \wedge A_1(i-N) \vee C_{32} \wedge A_2(i-N))$
<b>Переходы внутри множества S2</b>		
5	$((N+1) \leq s \leq 2N) \wedge (2 \leq i \leq (2N-s))$	$C_3 \wedge (C_{31} \wedge A_1(i) \vee C_{32} \wedge A_2(i))$
6	$((N+1) \leq s < 2N) \wedge (i = 1)$	$C_3 \wedge R(\bar{0}) \wedge (C_{31} \wedge A_1(1) \vee C_{32} \wedge A_2(1))$
7	$((N+1) \leq s \leq 2N) \wedge (i = 0)$	$C_3 \wedge \left( C_{31} \wedge (A_1(1) \wedge R(0) \vee A_1(0) \wedge R(\bar{1})) \vee \right. \\ \left. \vee C_{32} \wedge (A_2(1) \wedge R(0) \vee A_2(0) \wedge R(\bar{1})) \right) \vee C_0$
8	$((N+2) \leq s \leq 2N) \wedge (i = -1)$	$C_3 \wedge R(1) \wedge R_{A6} \wedge (C_{31} \wedge A_1(0) \vee C_{32} \wedge A_2(0))$
<b>Поглощающее состояние</b>		
9	$(s = (2N+1)) \wedge (i = 0)$	Процесс завершается

Совокупность представленных условий описывает переход канала из любого произвольного состояния пространства состояний  $S$  в любое, включая исходное. Соотношения, характеризующие вероятностные меры указанных событий будут являться универсальными для всего пространства состояний.

Пользуясь основными теоремами теории вероятностей, а именно теоремой сложения и умножения вероятностей получим следующее аналитическое выражение, характеризующее вероятностную меру полной группы событий и используемое для составления матрицы переходных вероятностей (МПВ):

$$P_{s,s+i}^{n,3} = \begin{cases} K_{u.u.} Q_a(0, N-n-1) Q_r(0, n), & "1" \\ K_{u.u.} Q_a(0, N-n) Q_r(1, n) Q_{A6}(n), & "2" \\ Q_a(0, N-n-1) (K_{u.u.} (1-Q_r(0, n)) + (1-K_{u.u.})), & "3" \\ Q_a(i-N, N-n-1), & "4" \\ Q_a(i, N-n), & "5" \\ Q_a(1, N-n) ((1-K_{u.u.}) + K_{u.u.} (1-Q_r(0, n))), & "6" \\ (1-K_{u.u.}) Q_a(0, N-n) + \\ + K_{u.u.} \left( Q_a(1, N-n) Q_r(0, n) + \right. \\ \left. Q_a(0, N-n) (1-Q_r(1, n)) \right), & "7" \\ K_{u.u.} Q_a(0, N-n) Q_r(1, n) Q_{A6}(n), & "8" \\ 1, & "9" \end{cases} \quad (17)$$

где  $n$  – число МА, находящихся в режиме повторной передачи, определяемое на основе следующего аналитического соотношения:

$$n = \begin{cases} s-1, & s < N, \\ s-N, & (s > N) \wedge (s \leq 2N), \\ 0, & s = N. \end{cases} \quad (18)$$

Для подтверждения свойства стохастичности матрицы [13, 14] докажем следующее утверждение.

**Утверждение:** Матрица  $P_{[W,W]}^{n,3}$  составленная по правилам (17) является сохраняющей вероятностную меру преобразованием множества состояний  $S$ .

**Доказательство:**

Для доказательства утверждения необходимо доказать, что ее элементы неотрицательны и сумма элементов каждой строки равна единице, т.е. выполняется условие:

$$\sum_{m=1}^W P_{nm} = 1, \quad P_{nm} \geq 0, \quad n, m = [1, W].$$

Так как каждый элемент матрицы  $P_{[W,W]}^{n,3}$  представляет собой сумму произведений положительных величин, то каждый элемент МПВ является положительным.

Теперь докажем, 
$$\sum_{m=1}^W P_{nm} = 1.$$

Проведем суммирование для элементов, относящихся в состояниям множества  $S_j$ . Данные состояния имеют следующий перечень типов переходов: 1, 3 и 4. Проведем сложение аналитических выражений расчета данных вероятностей:

$$\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^W P_{nm} = K_{u.u.} Q_a(0, N-n-1) Q_r(0, n) + \\ + Q_a(0, N-n-1) (K_{u.u.} (1-Q_r(0, n)) + (1-K_{u.u.})) + \\ + Q_a(i-N, N-n-1).$$

Раскроем скобки и сократим слагаемые, образующие полную группу событий:

$$\begin{aligned}
 \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^W p_{nm} &= \\
 &= K_{y.u.} Q_a(0, N-n-1) Q_r(0, n) + Q_a(0, N-n-1) K_{y.u.} (1-Q_r(0, n)) + \\
 &+ Q_a(0, N-n-1) (1-K_{y.u.}) + Q_a(i-N, N-n-1) = \\
 &= K_{y.u.} Q_a(0, N-n-1) (Q_r(0, n) + (1-Q_r(0, n))) + \\
 &+ Q_a(0, N-n-1) (1-K_{y.u.}) + Q_a(i-N, N-n-1) = \\
 &= Q_a(0, N-n-1) (K_{y.u.} + (1-K_{y.u.})) + Q_a(i-N, N-n-1) = \\
 &= Q_a(0, N-n-1) + Q_a(i-N, N-n-1).
 \end{aligned}$$

Так как второе слагаемое имеет место быть при условии  $(i-N) \geq 1$ , то в остатке мы имеем полную группу событий, вероятность которой равна 1.

Проведем суммирование для элементов, относящихся к состояниям множества  $S_2$ . Данные состояния имеют следующий перечень типов переходов: 2, 5, 6, 7 и 8. Проведем сложение аналитических записей расчета данных вероятностей:

$$\begin{aligned}
 \sum_{n=(N+1)}^{2N} \sum_{m=1}^W p_{nm} &= K_{y.u.} Q_a(0, N-n) Q_r(1, n) Q_{A6}(n) + Q_a(i, N-n) + \\
 &+ Q_a(1, N-n) ((1-K_{y.u.}) + K_{y.u.} (1-Q_r(0, n))) + \\
 &+ (1-K_{y.u.}) Q_a(0, N-n) + \\
 &+ K_{y.u.} (Q_a(1, N-n) Q_r(0, n) + Q_a(0, N-n) (1-Q_r(1, n))) + \\
 &+ K_{y.u.} Q_a(0, N-n) Q_r(1, n) Q_{A6}(n).
 \end{aligned}$$

Перераспределим элементы и вынесем общие множители и проведем сокращения в скобках, составляющих полную группу событий:

$$\begin{aligned}
 \sum_{n=(N+1)}^{2N} \sum_{m=1}^W p_{nm} &= \\
 &= K_{y.u.} Q_a(0, N-n) Q_r(1, n) (Q_{A6}(n) + Q_{A6}(n)) + Q_a(i, N-n) + \\
 &+ Q_a(1, N-n) (1-K_{y.u.}) + K_{y.u.} Q_a(1, N-n) (1-Q_r(0, n) + Q_r(0, n)) + \\
 &+ (1-K_{y.u.}) Q_a(0, N-n) + K_{y.u.} Q_a(0, N-n) (1-Q_r(1, n)) = \\
 &= K_{y.u.} Q_a(0, N-n) (1-Q_r(1, n) + Q_r(1, n)) + Q_a(i, N-n) + \\
 &+ Q_a(1, N-n) (1-K_{y.u.} + K_{y.u.}) + (1-K_{y.u.}) Q_a(0, N-n) = \\
 &= Q_a(0, N-n) (K_{y.u.} + 1 - K_{y.u.}) + Q_a(i, N-n) + Q_a(1, N-n) = \\
 &= Q_a(0, N-n) + Q_a(1, N-n) + Q_a(i, N-n).
 \end{aligned}$$

В остатке третье слагаемое имеет место быть при условии  $i \geq 2$ , поэтому в итоге мы имеем полную группу событий, вероятность которой равна 1.

Строка МПВ, соответствующая переходу из поглощающего состояния в любое другое состояние содержит всего один элемент, равный 1, так что для данной строки приведенное доказательство не требуется.

**Методика расчета своевременности передачи запроса**  
Расчет ВВХ передачи запроса в ПКМЦ рассчитывается на основе уравнения Колмогорова-Чепмена [13]:

$$P_{\langle W \rangle}^{n.z.(k)} = P_{\langle W \rangle}^{n.z.(0)} (P_{[W,W]}^{n.z.})^k = P_{\langle W \rangle}^{(k-1)} P_{[W,W]}, \quad (19)$$

где  $P_{\langle W \rangle}^{n.z.(0)} = \langle P_1^{n.z.(0)}, P_2^{n.z.(0)}, \dots, P_i^{n.z.(0)}, \dots, P_W^{n.z.(0)} \rangle$  – вектор вероятностей цепи на нулевом шаге;  $P_{\langle W \rangle}^{n.z.(k-1)}, P_{\langle W \rangle}^{n.z.(k)}$  – вектор вероятностей состояний цепи соответственно на  $(k-1)$ -м и  $k$ -м шагах;  $P_{[W,W]}^{n.z.}$  – МПВ исследуемого процесса.

Вероятностью передачи запроса за заданное время является вероятность перехода в поглощающее состояние  $P_W$  за число шагов, соответствующих заданному времени.

Основной вопрос в применении уравнения Колмогорова-Чепмена – это значение вектора начальных вероятностей  $P_{\langle W \rangle}^{n.z.(0)}$ . Данный вектор рассчитывается на основе вектора финальных вероятностей эргодической цепи, характеризующей работу КС [13, 14], исходя из предположения, состоящего в том, что в момент генерации запроса канал находился в стационарном режиме функционирования.

Получение вектора начального состояния  $P_{\langle W \rangle}^{n.z.(0)}$  ПКМЦ передачи запроса на основе вектора финальных вероятностей эргодической марковской цепи (ЭМЦ) осуществляется посредством перехода к условным вероятностям. Условие состоит в том, что один абонент сгенерировал запрос.

Переход осуществляется в два этапа:

1. Перерасчет вектора финальных вероятностей эргодической цепи функционирования КС при условии, что как минимум один (искомый абонент) находится в режиме первичной генерации запроса. Если один абонент находится в режиме первичной генерации, то максимальное число МА(з), находящихся в режиме повторной передачи равно не более  $(N-1)$ . Исходя из этого вектор финальных вероятностей должен быть перерасчитан на основе следующего аналитического соотношения:

$$p_n^{KC(\phi)^*} = P_n^{KC(\phi)} / \sum_{n=0}^{N-1} P_n^{KC(\phi)}, \quad (20)$$

где  $p_n^{KC(\phi)^*}$  – условная вероятность нахождения канала в состоянии  $n$ .

То есть общее число МА(з), находящихся в режиме повторной передачи возможно не более  $(N-1)$ . Вектор перерасчитанных финальных вероятностей примет вид  $P_{\langle n \rangle}^{KC(\phi)^*} = \langle P_0^{KC(\phi)^*}, P_1^{KC(\phi)^*}, \dots, P_{N-1}^{KC(\phi)^*}, 0 \rangle$ .

2. Перерасчет вектора финальных вероятностей с учетом теоремы Байеса [15] из условия, что искомый абонент сгенерировал запрос и на начальном шаге моделирования передаст его в КС.

$$P_n^{KC(\phi)^*} = \frac{Q_a^{uCK}(n) P_n^{KC(\phi)^*}}{\sum_{n=0}^{N-1} (Q_a^{uCK}(n) P_n^{KC(\phi)^*})} \quad (21)$$

где  $Q_a^{uCK}(n)$  – вероятность генерации запроса искомым абонентом при нахождении в состоянии  $n$ .

$$Q_a^{иск}(n) = (P_{a1}q_{a1} + P_{a2}q_{a2})^{(N-n)/N} \quad (22)$$

Таким образом, вектор начального состояния процесса передачи запроса по КС будет иметь следующий вид

$$P_{\langle W \rangle}^{n.z.(0)} = \left\langle \begin{matrix} P_1^{n.z.(0)} = P_0^{KC(\phi)*}, P_2^{n.z.(0)} = P_1^{KC(\phi)*}, \dots, \\ P_N^{n.z.(0)} = P_{N-1}^{KC(\phi)*}, P_{N+1}^{n.z.(0)} = 0, \dots, P_W^{n.z.(0)} = 0 \end{matrix} \right\rangle \quad (23)$$

Исходя из представленного выше описания, общий алгоритм расчета своевременности на основе ММ функционирования КС и ММ передачи запроса должен иметь вид, представленный на рисунке ниже.

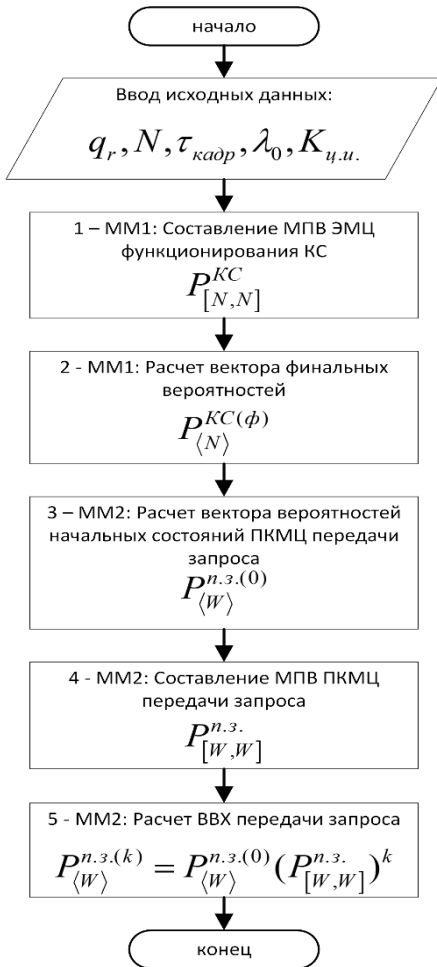


Рис. 4. Блок-схема построения и использования математических моделей для оценки своевременности передачи запроса

Результат работы методики проиллюстрируем на графиках сопоставления своевременности передачи запроса в режиме двойного использования КС на основе штатного алгоритма и на основе предлагаемой стратегии передачи запроса [8]. В целях общности результатов исследования ниже представлены результаты расчета ВВХ передачи запроса инвариантные к параметрам радиоинтерфейса, а именно к размеру кадра. С этой целью в качестве входных данных использовалась интенсивность генерации запросов не в секунду ( $\lambda_0$ ), а на шаг перехода (кадр) ( $\lambda_a$ ). Время передачи запроса при требуемой вероятности при этом рассчитывалось в шагах перехода исследуемого процесса (в кадрах).

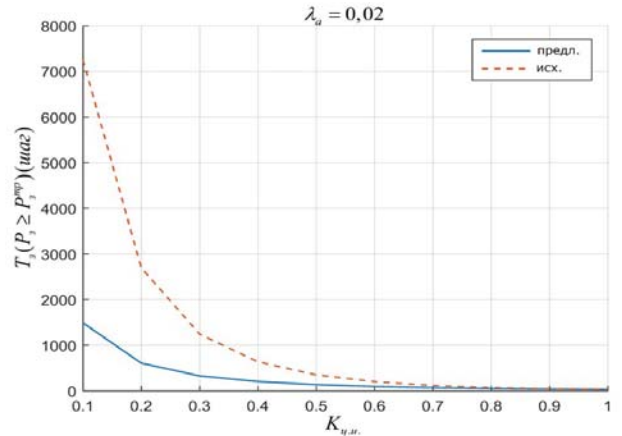


Рис. 5. Зависимость времени передачи запроса с требуемой вероятностью от коэффициента целевого использования для  $\lambda_a = 0,02$  («исх.» – исходный алгоритм СМД; «предл.» – предлагаемый алгоритм СМД)

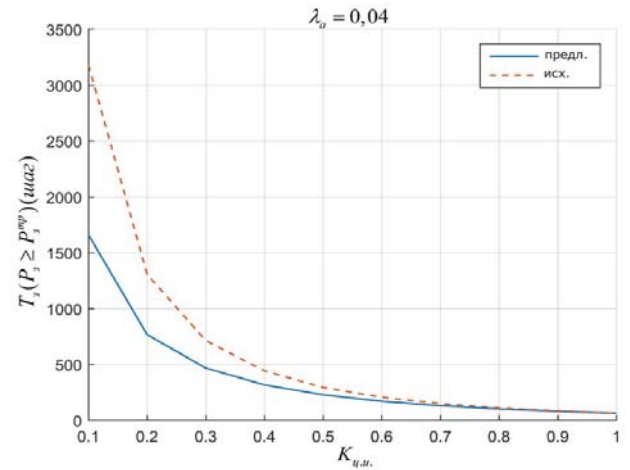


Рис. 6. Зависимость времени передачи запроса с требуемой вероятностью от коэффициента целевого использования для  $\lambda_a = 0,04$  («исх.» – исходный алгоритм СМД; «предл.» – предлагаемый алгоритм СМД)

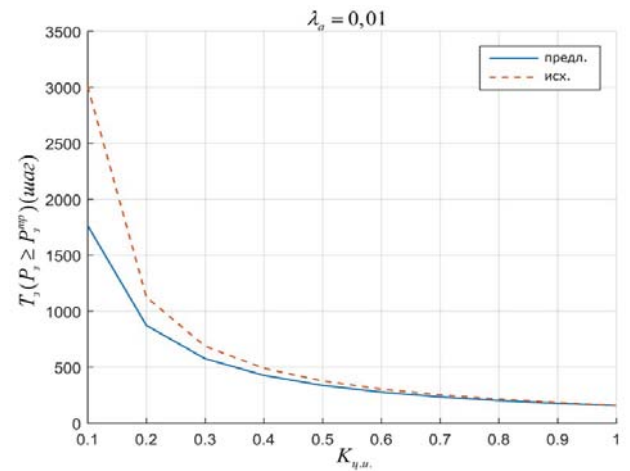


Рис. 7. Зависимость времени передачи запроса с требуемой вероятностью от коэффициента целевого использования для  $\lambda_a = 0,01$  («исх.» – исходный алгоритм СМД; «предл.» – предлагаемый алгоритм СМД)



Из представленных графиков видно преимущество предлагаемого алгоритма СМД, учитывающего режим двойного использования КС над исходным алгоритмом передачи запросов в режиме СМД. Данное преимущество тем нагляднее, чем меньше интенсивность входного потока запросов и чем меньше коэффициент целевого использования КС.

### Заключение

Разработанная математическая модель передачи запроса является основой методики расчета вероятностно-временной характеристики. Разработанная методика показала преимущество предлагаемого подхода к передаче запросов в режиме двойного использования запросного канала сигнализации по отношению к штатному алгоритму передачи. Данное преимущество становится тем выразительнее, чем меньше пропускной способности выделяется для передачи запросов и в ряде случаев достигает более 100%.

Сформированная методика расчета своевременности будет являться основой методики определения минимального значения коэффициента целевого использования в условиях обеспечения требований по своевременности передачи запроса на установление соединения, позволяющей оценить эффективность предлагаемого подхода двойного использования канала сигнализации к организации передачи детерминированного трафика.

### Литература

1. Таненбаум Э., Уэзеролл Д. Компьютерные сети, 5-е изд. СПб.: Питер, 2016. 848 с.
2. Куроуз Дж., Росс К. Компьютерные сети. Нисходящий подход. М.: Издательство Э, 2016. 912 с.
3. Chung W.S., Un C.K. Collision resolution algorithm for M-priority users // IEE Proceedings Communications 142. 1995. P. 151-157.
4. Frigon J.F. A Pseudo-Bayesian ALOHA Algorithm with Mixed Priorities / Frigon Jean-François, C.M. Leung Victor // Wireless Networks. 2001. Vol. 7. P. 55-63.
5. Liu M., Papantoni-Kazakos P. A random access algorithm for data networks carrying high priority traffic // Proceedings of INFOCOM'90. 1990. Vol. 3. P. 1087-1094.
6. Makrakis D., Mander R.S., Orozco-Barbosa L. A spread slotted random access control protocol with multi-priority for personal and mobile communication networks carrying integrated traffic // Proceedings of 1995 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. 1995. Vol. 1. P. 132-136.
7. Nain P. Analysis of a two-mode ALOHA network with infinite capacity buffer // Proc. of Intern. Seminar on Computer Networking and Performance Evaluation. North-Holland, Amsterdam. 1985. P.49-64.
8. Донцов Д.В., Косяк А.И., Шиманов С.Н. Передача запросов в режиме двойного использования запросного канала по алгоритму тактированного случайного множественного доступа // Научно-технический журнал Известия Института инженерной физики. Серпухов, 2020. №2 (56). С. 61-64.
9. Ковальков Д.А., Крикунов А.А., Гаврилин Е.А. Расчет вероятностно-временных характеристик регистрации в сети подвижной радиосвязи абонентов по протоколу случайного множественного доступа «S-Aloha» // Труды XII Международной научной конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ-2017». Владимир, 2017. С. 93-96.
10. Крикунов А.А., Ковальков Д.А., Гаврилин Е.А. Применение дискретных марковских моделей с переменным шагом переходов для анализа протоколов случайного множественного доступа с контролем занятости канала // Новые информационные технологии в системах связи и управления: Труды XVII Рос. НТК / М-во промышленности и торговли Рос. Федерации, Гос. Корпорация «Ростех», АО «ОПК», ОАО «Концерн радиостроения «Вега», АО «Калужский НИИ телемеханических устройств». Калуга: Изд. ООО «Ноосфера», 2018. С. 79-84.
11. Крикунов А.А., Ковальков Д.А., Гаврилин Е.А., Ломов П.С. Применение конечных марковских цепей с переменным шагом переходов для анализа протоколов случайного множественного доступа с контролем занятости канала и обнаружением коллизий на этапе конкуренции // Тр. XXXVIII Всерос. НТК (межведомственная) «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем» / Фил. Воен. акад. РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов Моск. обл.). Серпухов, 2019. Ч. 2. С. 41-46.
12. Гнеденко Б. В. Введение в теорию массового обслуживания. М. ЛКИ, 2021. 398с.
13. Базель М.Фль-Эйде. Введение в конечные цепи Маркова. Молдова. Palmarium Academic Publishing, 2020. 196 с.
14. Стратонович Р. Л. Условные марковские процессы и их применение к теории оптимального управления. М.: Ленанд, 2021. 320 с.
15. Боровков А.А. Теория вероятностей. М.: Либроком, 2021. 656 с.

## CALCULATION OF THE TIMELINESS OF TRANSMISSION OF A REQUEST IN THE MODE OF DUAL USE OF THE SIGNALING CHANNEL

**ALEKSANDR I. KOSYAK**

Serpukhov, Russia, kosyakai@iifmail.ru.

**DMITRY D. DONTSOV**

Serpukhov, Russia, info@iifmail.ru

**IRINA A. YAKIMOVA**

Serpukhov, Russia, zelenoglazka1989@mail.ru

### ABSTRACT

**Introduction:** it is shown that when organizing the collection of short digital messages in a trunking radio communication network, service request communication channels can be used, transmitting packets-requests to establish a connection. With this approach, the question arises about the size of the bandwidth of the request communication channel, allocated for collecting information, at which the fulfillment of the requirements for establishing a connection will be preserved. **Purpose:** the purpose of the work is to develop a methodology for calculating the timeliness of transmission of requests for establishing a connection in the context of transmission of short digital messages. This technique is the basis of the technique for determining the bandwidth of the request communication channel, allocated for solving the problem of collecting short digital messages. **Results:** A mathematical description of the revealed feature was carried out, which is the scientific novelty of the research results. An analytical rule for calculating the matrix of transition probabilities and the procedure for calculating the vector of initial probabilities of the request transmission process are presented, which allow,

**KEYWORDS:** *trunking radio communication systems; unadapted clocked random multiple access; request communication channel; absorbing finite Markov chain.*

based on the Kolmogorov-Chapman equation, to mathematically describe the request transmission process based on the random multiple access algorithm and calculate the probabilistic-temporal characteristics of the request transmission. The method of calculating the probabilistic-temporal characteristics of the request transmission based on the compiled mathematical model of the request transmission and the mathematical model of the operation of the request channel is presented. The effect of taking into account the revealed features is shown, expressed in increasing the timeliness of the request transmission. **Practical relevance:** Formed a methodology, which is the basis of the methodology for determining the optimal values of the parameters of the double use of the request channel, which makes it possible to organize the transmission of deterministic traffic of short digital messages over the request channel with a given level of timeliness of transmission of requests to establish a connection. **Discussion:** the use of the developed methodology will allow organizing a periodic collection of short digital messages in the trunking radio access network without using traffic channels.

### REFERENCES

1. Tanenbaum E., Uezeroll D. Komp'yuternyye seti, 5-ye izd. [Computer Networks, 5th ed.] Saint Petersburg: Piter, 2016. 848 p. (In Rus)
2. Kurouz Dzh., Ross K. Komp'yuternyye seti. Niskhodyashchiy podkhod [Computer networks. Top-down approach]. Moscow: Publishing house E, 2016. 912 p. (In Rus)
3. Chung W.S., Un C.K. Collision resolution algorithm for M-priority users. *IEE Proceedings Communications* 142. 1995. P. 151-157.
4. Frigon J.F., Leung Victor C.M. A Pseudo-Bayesian ALOHA Algorithm with Mixed Priorities. *Wireless Networks*. 2001. Vol. 7. P. 55-63.
5. Liu M., Papantoni-Kazakos P. A random access algorithm for data networks carrying high priority traffic. *Proceedings of INFOCOM'90*. 1990. Vol. 3. P. 1087-1094.
6. Makrakis D., Mander R.S., Orozco-Barbosa L. A spread slotted random access control protocol with multi-priority for personal and mobile communication networks carrying integrated traffic. *Proceedings of 1995 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*. 1995. Vol. 1. P. 132-136.
7. Nain P. Analysis of a two-mode ALOHA network with infinite capacity buffer. *Proc. of Intern. Seminar on Computer Networking and Performance Evaluation*. North-Holland, Amsterdam. 1985. P. 49-64.
8. Dontsov D.V., Kosyak A.I., Shimanov S.N. Peredacha zaprosov v rezhime dvoynogo ispol'zovaniya zaprosnogo kanala po algoritmu taktirovannogo sluchaynogo mnozhestvennogo dostupa [Transmission of requests in the mode of double use of the request channel according to the algorithm of clocked random multiple access]. *Scientific and technical journal Izvestia of the Institute of Engineering Physics*. Serpukhov, 2020. No. 2 (56). P. 61-64. (In Rus)
9. Kovalkov D.A., Krikunov A.A., Gavrilin E.A. Raschet veroyatnostno-vremennykh kharakteristik registratsii v seti podvizhnoy radiosvyazi abonentov po protokolu sluchaynogo



mnozhestvennogo dostupa "S-Aloha" [Calculation of the probabilistic-temporal characteristics of registration in the mobile radio network of subscribers under the protocol of random multiple access "S-Aloha"]. *Proceedings of the XII International Scientific Conference "Advanced Technologies in Information Transmission Means - PTSPI-2017"*. Vladimir, 2017. P. 93-96. (In Rus)

10. Krikunov A.A., Kovalkov D.A., Gavrilin E.A. Primeniye diskretnykh markovskikh modeley s peremennym shagom perekhodov dlya analiza protokolov sluchaynogo mnozhestvennogo dostupa s kontrolom zanyatosti kanala [Application of discrete Markov models with a variable step of transitions for the analysis of protocols of random multiple access with control of the channel occupancy]. *New information technologies in communication and control systems: Proceedings of the XVII Ros. Rostec Corporation, OPK JSC, Radio Engineering Concern Vega JSC, Kaluga Research Institute of Telemechanical Devices JSC*. Kaluga: Ed. Noosphere, 2018. P. 79-84. (In Rus)

11. Krikunov A.A., Kovalkov D.A., Gavrilin E.A., Lomov P.S. Primeniye konechnykh markovskikh tsepey s peremennym shagom perekhodov dlya analiza protokolov sluchaynogo

mnozhestvennogo dostupa s kontrolom zanyatosti kanala i obnaruzheniyem kolliziy na etape konkurentsii [Application of finite Markov chains with a variable step of transitions for the analysis of protocols of random multiple access with control of channel occupancy and collision detection at the stage of competition]. *XXXVIII All-Russia. STC (interdepartmental) "Problems of efficiency and safety of functioning of complex technical and information systems"* / Phil. Military. acad. Strategic Missile Forces named after Peter the Great (Serpukhov, Moscow region). Serpukhov, 2019. Part 2. P. 41-46. (In Rus)

12. Gnedenko B.V. Vvedeniye v teoriyu massovogo obsluzhivaniya [Introduction to the theory of queuing]. Moscow: LKI, 2021. 398 p. (In Rus)

13. Bazel' M.FI'-Eyde. Vvedeniye v konechnyye tsepi Markova [An introduction to finite Markov chains]. Moldova: Palmarium Academic Publishing, 2020. 196 p. (In Rus)

14. Stratonovich R.L. Uslovnnyye markovskiye protsessy i ikh primeniye k teorii optimal'nogo upravleniya [Conditional Markov Processes and Their Application to Optimal Control Theory]. Moscow: Lenand, 2021. 320 p. (In Rus)

15. Borovkov A.A. Teoriya veroyatnostey [Probability theory]. Moscow: Librokom, 2021. 656 p. (In Rus)

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS:

**Kosyak A.I.**, Ph.D., Senior Research Officer, Automated Control System and Communications Department, Institute of Engineering Physics, Serpukhov, Russia

**Dontsov D.V.**, Applicant for the Institute of Engineering Physics, Serpukhov, Russia

**Yakimova I.A.**, Serpukhov, Russia

---

**For citation:** A. I. Kosyak, D. D. Dontsov, I. A. Yakimova. Calculation of the timeliness of transmission of a request in the mode of dual use of the signaling channel. *H&ES Reserch*. 2021. Vol. 13. No. 4. P. 18-28. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-4-18-28 (In Russian)

# ФОРМИРОВАНИЕ ДЕСКРИПТИВНЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ЗАПРОСОВ ПРИ ТЕХНИЧЕСКОМ ДИАГНОСТИРОВАНИИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

**КУРЧИДИС**

**Виктор Александрович<sup>1</sup>**

**АНИСИМОВ**

**Олег Витальевич<sup>2</sup>**

**ПУГАЧЕВ**

**Алексей Юрьевич<sup>3</sup>**

**ПУШКИН**

**Константин Александрович<sup>4</sup>**

## Сведения об авторах:

<sup>1</sup>д.т.н., профессор, профессор кафедры автоматики и вычислительных средств, Ярославское военное училище противовоздушной обороны, г. Ярославль, Россия, idahmer2@yandex.ru

<sup>2</sup>к.т.н., доцент, профессор кафедры автоматики и вычислительных средств, Ярославское военное училище противовоздушной обороны, г. Ярославль, Россия, qwaker@inbox.ru

<sup>3</sup>Пугачев Алексей Юрьевич, к.т.н., заместитель начальника отдела (научно-исследовательского) Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны, г. Ярославль, Россия, nil.vko@gmail.com

<sup>4</sup>Пушкин Константин Александрович, начальник научно-исследовательской лаборатории отдела (научно-исследовательского) Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны, г. Ярославль, Россия, konstantinpush@gmail.com

## АННОТАЦИЯ

**Введение:** восстановление исправного состояния сложных технических комплексов связано с проведением технического диагностирования, цель которого состоит в определении мест и причин возникшей неисправности. Повышение эффективности диагностирования может быть достигнуто за счет использования автоматизированных средств информационной поддержки, предоставляющих обслуживающему персоналу требуемую диагностическую информацию на основе формируемого запроса. Использование языковых запросных средств в системах такого типа позволяет обслуживающему персоналу сформулировать условия запросов более точно и конкретно, однако такие средства требуют разработки дополнительных моделей интерпретации условий, представленных в конструкциях естественного языка. **Цель исследования:** целью работы является разработка формальной модели, отражающей структуру и правила формирования языковых запросов, в которых определяются диагностические признаки. **Методы:** цель достигается путем последовательного описания процедур, определяющих лексические, синтаксические и семантические правила анализа языковых запросов обслуживающего персонала к автоматизированной системе информационной поддержки. Приведенная последовательность процедур языкового анализа обеспечивает выделение в языковых запросах обслуживающего персонала формального множества диагностических признаков, которые используются для формирования формального запроса к информационному источнику сведений о неисправностях радиоэлектронной аппаратуры. Показано, что машинный разбор таких запросов, называемых в работе дескриптивными диагностическими запросами, целесообразно выполнять путем выявления соответствия языковых конструкций набору формальных правил, определяемых грамматикой естественно-подобного языка. **Результаты:** проведенные исследования подтверждают возможность и создают условия по включению в автоматизированные системы информационной поддержки технического диагностирования и ремонта запросно-ответных средств, обеспечивающих формирование вероятных мест и причин неисправностей радиоэлектронной аппаратуры по запросам обслуживающего персонала, выполненным в конструкциях естественного (русского) языка. **Практическая значимость:** внедрение подобного механизма в автоматизированные системы позволит сократить количество непроизводительных потерь, не связанных непосредственно с диагностированием, что положительно скажется на временных показателях восстановления сложных технических комплексов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** радиоэлектронная аппаратура; техническое диагностирование; диагностические модели; формализованная концептуализация; семантические шаблоны.

**Для цитирования:** Курчидис В.А., Анисимов О.В., Пугачев А.Ю., Пушкин К.А. Формирование дескриптивных диагностических запросов при техническом диагностировании радиоэлектронной аппаратуры // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 4. С. 28-36. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-4-28-36

## Введение

В процессе эксплуатации сложных технических комплексов обслуживающий персонал (ОП) сталкивается с нестандартными ситуациями, которые связаны с нарушением функционирования радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), входящей в состав этих комплексов. В основе этих нарушений лежат различные неисправности, обусловленные схемотехническими и конструктивными особенностями аппаратуры, а также особенностями режимов ее использования по назначению. Возникновение неисправностей РЭА связано с отклонением параметров от номинальных значений, что может быть выражено нарушением одного или нескольких свойств аппаратуры. Ключевую роль в восстановлении исправного состояния аппаратуры занимает операция диагностирования.

Для определения вероятного места и причины возникновения неисправности обслуживающему персоналу требуется выполнить ряд действий, направленных на получение диагностической информации [1, 2]. Информация такого вида содержит описание РЭА в виде набора свойств, характеризующих состояние или поведение аппаратуры, как не соответствующее нормативно-технической документации, то есть как неисправное. Во всяком таком свойстве может быть выделен один или несколько диагностических признаков, описывающих исправную или неисправную аппаратуры по одному из аспектов (структурный, функциональный, параметрический, и т.п.), благодаря чему обслуживающий персонал может составить «общую картину» возникшего в аппаратуре нарушения и ее связь с местом и причиной неисправности.

При диагностировании распространено использование диагностических моделей РЭА, известных как «диагностические портреты неисправностей» [3, 4, 5, 6, 7], структура которых основывается на совокупности пар вида «признаки-причина». Диагностические портреты неисправностей (ДПН) РЭА, представленные подобным образом, в настоящее время приводятся в эксплуатационной документации (ЭД) на бумажных и электронных носителях преимущественно в текстовой или табличной форме на основе естественно-языковых средств и характеризуются низким уровнем формализации. Основным способом обращения ОП к этим моделям является применение не естественно-языковых средств, а запросных механизмов, основанных на использовании традиционных средств указания: ввод с клавиатуры, перемещение и нажатие кнопок мыши, выбор элементов меню и др. Это создает существенные ограничения в части оперативного формирования запросов к носителям ЭД, а также получения диагностической информации в ответ на такие запросы, что приводит к нежелательным временным издержкам и негативно влияет на время выполнения операции диагностирования аппаратуры в целом.

С этой точки зрения в качестве одного из перспективных направлений повышения степени автоматизации процесса диагностирования следует отметить подход к представлению неисправностей в пространстве свойств, основанный на формализованной концептуализации предметной области [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]. Этот подход позволяет выполнить многоаспектное описание исправной и неисправной аппаратуры в предметных терминах и понятиях естественного языка, что

обеспечивает единство формального и содержательного представления свойств РЭА.

## Формирование естественно-языковых запросов к формализованной концептуальной диагностической модели

В данной работе предлагается подход к формированию естественно-языковых запросов ОП к формализованной концептуальной диагностической модели (ФКДМ) аппаратуры, основанный на использовании вышеупомянутого подхода к представлению неисправностей. За счет использования такого представления выполняется формализованное описание нарушения исправного состояния аппаратуры, выражаемого в запросах на естественно-подобном языке (ЕПЯ). Особенность предлагаемого подхода состоит в том, что запросы, представляемые в таком виде, в рамках естественно-языковых конструкций позволяют формально определить совокупность диагностических признаков неисправностей, необходимых для локализации отказов РЭА по диагностической модели [5, 6, 8].

Решение поставленной задачи связывается с выполнением анализа структуры запросов к ФКДМ на естественном языке. Обращение ОП в форме запросов к автоматизированной системе диагностирования в целях определения вероятных мест и причин отказа (МПО) означает наличие в запросах явного описания, как минимум, одного диагностического признака неисправности, который был выявлен или измерен на текущем этапе операции диагностирования. В работе такие запросы называются дескриптивными диагностическими запросами (ДДЗ).

С учетом структуры построения диагностических моделей РЭА на основе ДПН информационный запрос ОП при определении МПО в общем случае целесообразно представить с использованием нотаций в форме Бэкуса-Наура в виде следующей структуры:

$$Query = [IPW]\{SignPart\},$$

где  $IPW$  – вопросительное местоименное слово;  $SignPart$  – признаковая часть диагностического портрета неисправности аппаратуры.

В процессе диагностирования запросы ОП к системе автоматизации (СА) могут быть короткими, простыми по структуре, например, «Почему нет усиления в ракетном канале», «Отсутствует проводная связь с контейнером Ф2Е2». При большом количестве признаков неисправностей, структура ДДЗ может быть представлена в виде достаточно сложного предложения: «Двигатели гироскопа в первом ракетном канале гудят, но не вращаются», «При поступлении управляющего напряжения на разъем 2Ш12 не формируется сигнал синхронизации, хотя контрольная лампа НЕИСПР не горит».

Синтаксическая структура предложений в запросах, основанная на выделении из таких предложений базовых языковых конструкций, соответствующих базовым свойствам РЭА, может быть представлена в виде следующего выражения:

$$SignPart = Prop [ConUn Prop], \quad (1)$$

где *Prop* – свойство аппаратуры, характеризующий в общем случае как исправное, так и неисправное ее состояние;

*ConUn* – соединительный союз или соединительное слово, используемое преимущественно для объединения приведенных свойств аппаратуры в единый ДЗЗ.

С учетом выражения (1) определение МПО состоит в поиске соответствия между всяким свойством *Prop* аппаратуры и всяким базовым свойством  $p_i$  ФКДМ, характеризующим исправную или неисправную аппаратуру. Для определения в формализованном виде связи между данными в запросах ОП и ДПН в диагностической модели свойства *Prop* целесообразно представлять в объектно-предикатной форме (ОПФ):

$$Prop = \langle object \rangle \langle predicate \rangle \langle sign \rangle, \quad (2)$$

где *object* – элемент описания, который характеризуется признаком; *sign* – элемент описания, которым характеризуется объект; *predicate* – тип приводимой характеристики.

Использование ОПФ для описания аппаратуры в виде совокупности свойств позволяет выделить в ДДЗ элементы многоаспектного описания аппаратуры [2, 15], соответствующие в ФКДМ РЭА вершинам  $e$  семантической сети  $G_o$ , а также семантические связи, соответствующие ребрам  $r$  этой сети, что выступает основой для формального представления всякого диагностического признака  $P$  неисправностей РЭА в следующем виде:

$$P = e_a^{(w)} r_b e_c^{(x)} \cup e_d^{(y)} r_g e_h^{(z)} \cup \dots, \quad (3)$$

где  $e_a, e_c, e_d, e_h$  и так далее – элементы многоаспектного описания аппаратуры, соответствующие вершинам графа  $G_o$ ;  $r_b, r_g$  – типизированные отношения между элементами описания аппаратуры, соответствующие ребрам графа  $G_o$ .

Верхний индекс элементов в выражении (3) может принимать значения 0 или 1 и означает модификатор состояния элементов описания: 0 – исправный, отличный от нуля – неисправный. Типизированные отношения  $r_b, r_g$  этого выражения, а также аспект описания объектов и признаков выступают основой для формирования семантических правил, предназначенных для определения корректности формальных языковых конструкций с точки зрения содержащегося в них смысла. Например, предложение «Блок ФРЗБ1Е2 выполняет функцию синхронизации» с семантической точки зрения может быть представлено в ОПФ, как выражение  $e_1^{(0)} r_2 e_2^{(0)}$ . При наличии семантического правила  $q_1(r_2) = E_s r_2 E_f$ , это выражение является семантически корректным, так как в нем в качестве объекта выступает элемент структуры уровня не ниже уровня «ячейка», а в качестве признака – элемент описания функционального. Предложение «Функция синхронизации выполняет напряжение 27 вольт» является семантически некорректным при отсутствии семантического правила вида  $q(E_f r_2 E_p)$ .

На основе семантического анализа различных предложений запросов, содержащих описание свойств аппаратуры и/или признаков неисправностей, выделено 12 видов типовых шаблонов, которые в работе называются семантическими шаблонами. Эти шаблоны отличаются своей структурой

и формальным представлением [16, 17], так что их использование позволяет производить выделение базовых понятий и терминов в запросах и устанавливать смысловые связи между ними.

В таблице 1 на примерах проиллюстрирована формальная структура семантических шаблонов в ОПФ, а также возможности их использования для анализа различных запросов с целью выделения базовых понятий и терминов, образующих семантическую основу предложения запроса.

Таблица 1  
Использование семантических шаблонов для анализа запросов на ЕПЯ

№ п/п	Формальное представление семантического шаблона	Выделение базовых понятий и терминов	Пример запроса на естественном языке
01.	$x r_2 e_i^{(a)}, x \in E_s, e_i \in E_f$	Название функции, состояние выполнения функции	[Куда] пропало охлаждение[?]
02.	$x r_2 e_i^{(a)}, x \in E_s, e_i \in E_f$	Наименование функции	[Что случилось с] индикацией[?]
03.	$E_i r_2 e_j^{(a)}, E_i \subseteq E_s, e_j \in E_f$	Наименование функции; состояние выполнения функции; тип структурного компонента	[Почему] изображение пропало [с] экрана[?]
04.	$e_i r_3 e_j^{(a)}, e_i \in E_s, e_j \in E_{II}$	Тип структурного компонента; маркировка компонента; тип параметра; значение параметра	[Куда исчезло] напряжение [на] контакте К1[?]
05.	$x r_3 e_j^{(a)}, x \subseteq E_s, e_j \in E_{II}$	Маркировка структурного компонента; тип параметра; значение параметра	[Почему] напряжение [на] К1 13 Вольт[?]
06.	$x r_3 e_j^{(a)}, x \subseteq E_s, e_j \in E_{II}$	Тип структурного компонента; тип параметра; значение параметра	[Что произошло с] мощностью клистро-на[?]
07.	$x r_3 e_j^{(a)}, x \subseteq E_s, e_j \in E_f$	Тип структурного компонента; состояние выполнения функции	[Почему] вентилятор не вращается[?]
08.	$e_i r_3 E_j^{(a)}, e_i \in E_s, E_j \subseteq E_f$	Тип структурного компонента; маркировка структурного компонента; состояние выполнения функции	[В чем проблема с] экраном блока Б1[?]
09.	$e_i r_3 E_j^{(a)}, e_i \in E_s, E_j \subseteq E_{II}$	Тип структурного компонента, маркировка структурного компонента; значение параметра	[Что делать если] нет индикации блока Б1[?]
10.	$E_i r_2 x, E_i \subseteq E_s, x \in E_f$	Тип структурного компонента	[Что случилось с] экраном[?]
11.	$e_i r_2 x, e_i \in E_s, x \in E_f$	Тип структурного компонента; маркировка структурного компонента	[Что не так с] охладителем ОХЛ1[?]
12.	$e_i r_2 e_j^{(a)}, e_i \in E_s, e_j \in E_f$	Тип структурного компонента; маркировка структурного компонента; название функции; состояние выполнения функции	[Почему] не включается питание [на] блоке Б1

Следует отметить, что всякий семантический шаблон по своему содержанию отражает свойство аппаратуры, а по структуре приведен к ОПФ, как показано в выражении (2). Такая структура формально представляет языковую конструкцию «подлежащее-сказуемое-дополнение», где подлежащее соответствует объекту, сказуемое – предикату, а дополнение – признаку. Подобная языковая конструкция с точки зрения рассматриваемой предметной области обладает рядом особенностей, одной из которых является наличие сложных недетерминированных сочетаний вида «тип объекта и/или маркировка», «тип признака и/или подтип признака и/или значение», «тип предиката и/или подтип нарушения» и т. п. Примерами таких сочетаний могут выступать «блок ФР361Е2», «ячейка с установочным местом У11» и т. п.

Достаточно свободная форма представления свойства аппаратуры в конструкциях естественного языка предполагает, что некоторые элементы ОПФ могут отсутствовать ввиду смысловой избыточности [12, 17]. С этой точки зрения, в качестве примеров неполных предложений можно привести следующие высказывания: «Почему нет синхронизации», «Куда исчезло напряжение», «Что случилось с изобращением» и др.

Предложения подобного вида с точки зрения семантического анализа содержат неопределенность, характеризующуюся отсутствием явного указания на объект или признак в структуре ОПФ. Это требует создания и применения определенных формальных правил разрешения отмеченной неопределенности.

Снятие неопределенностей в предложениях запросов предлагается выполнять за счет привлечения к семантическому анализу дополнительных шаблонов 4 или 12, в зависимости от исходного шаблона, как показано в табл. 2.

Таблица 2  
Снятие неопределенностей в запросах на ЕПЯ

№ исходного семантического шаблона	Формальное представление семантического шаблона	Может быть разрешен в шаблон	Сущность действий, направленных на разрешение
1	$x r_2 e_i^{(a)}, x \in E_s, e_i \in E_f$	4 или 12	$\exists x(x r_2 e_i^{(a)}), x \in E_s, e_i \in E_f$
2	$x r_2 e_i^{(s)}, x \in E_s, e_i \in E_f$	4 или 12	$\exists x(x r_2 e_i^{(s)}), x \in E_s, e_i \in E_f$
3	$E_i r_2 e_j^{(a)}, E_i \subseteq E_s, e_j \in E_f$	4 или 12	$\exists x \in E_i(E_i r_2 e_j^{(a)}), E_i \subseteq E_s, e_j \in E_f$
4	$e_i r_3 e_j^{(a)}, e_i \in E_s, e_j \in E_{II}$	данных достаточно	-
5	$x r_3 e_j^{(a)}, x \subseteq E_s, e_j \in E_{II}$	4	$\exists x(x r_3 e_j^{(a)}), x \in E_s, e_j \in E_{II}$
6	$x r_3 e_j^{(s)}, x \subseteq E_s, e_j \in E_{II}$	4	$\exists x(x r_3 e_j^{(s)}), x \in E_s, e_j \in E_{II}$
7	$x r_3 e_j^{(a)}, x \subseteq E_s, e_j \in E_f$	12	$\exists x(x r_3 e_j^{(a)}), x \subseteq E_s, e_j \in E_f$
8	$e_i r_3 E_j^{(s)}, e_i \in E_s, E_j \subseteq E_f$	12	$\exists < x, E_j > (e_i r_3 E_j^{(s)}), e_i \in E_s, E_j \subseteq E_f$
9	$e_i r_3 E_j^{(s)}, e_i \in E_s, E_j \subseteq E_{II}$	4	$\exists < x, E_j > (e_i r_3 E_j^{(s)}), e_i \in E_s, E_j \subseteq E_{II}$
10	$E_i r_2 x, E_i \subseteq E_s, x \in E_f$	4 или 12	$\exists < x, E_i > (E_i r_2 x), E_i \subseteq E_s, x \in E_f$
11	$e_i r_2 x, e_i \in E_s, x \in E_f$	4 или 12	$\exists (e_i r_2 x), e_i \in E_s, x \in E_f$
12	$e_i r_2 e_j^{(a)}, e_i \in E_s, e_j \in E_f$	данных достаточно	-

Результатом действий, направленных на снятие неоднозначности в предложениях ДДЗ, выступает формализованное полное представление свойств аппаратуры, характери-

зующих неисправность в виде ОПФ. При этом каждый элемент триады  $e_i r_2 e_j$  ОПФ указывает на соответствующий элемент многоаспектного описания аппаратуры, который приводится в ФКДМ РЭА в формальном виде. Благодаря этому обеспечивается единство формализованного представления свойств и признаков аппаратуры, как в запросах, так и в диагностической модели. На этом основывается согласование формы представления диагностических признаков неисправностей в запросах на ЕПЯ с многоаспектным описанием исправной и неисправной РЭА, представляемым в ФКДМ РЭА. Это согласование обеспечивается путем формирования критерия  $K_{TD}$  выбора технического диагноза (ТД). Такой критерий определяется на основе одного или нескольких диагностических признаков неисправностей, представляемых ОПФ-триадами выражения (3).

Формально критерий  $K_{TD}$  может быть представлен в следующем виде:

$$K_{TD} = \sum_{i=1}^N DFM_i,$$

где  $DFM$  – диагностический признак неисправности.

Сущность действий, направленных на выборку диагностической информации из ФКДМ РЭА по ДДЗ, иллюстрируется на рисунке. Такая информация в общем случае частично или полностью отражает признаковую часть ДПН. При этом, если множество признаков неисправностей, которые содержатся в структуре ДДЗ, совпадает со множеством признаков неисправностей в диагностическом портрете, то технический диагноз определяется компонентом «причина» ДПН.

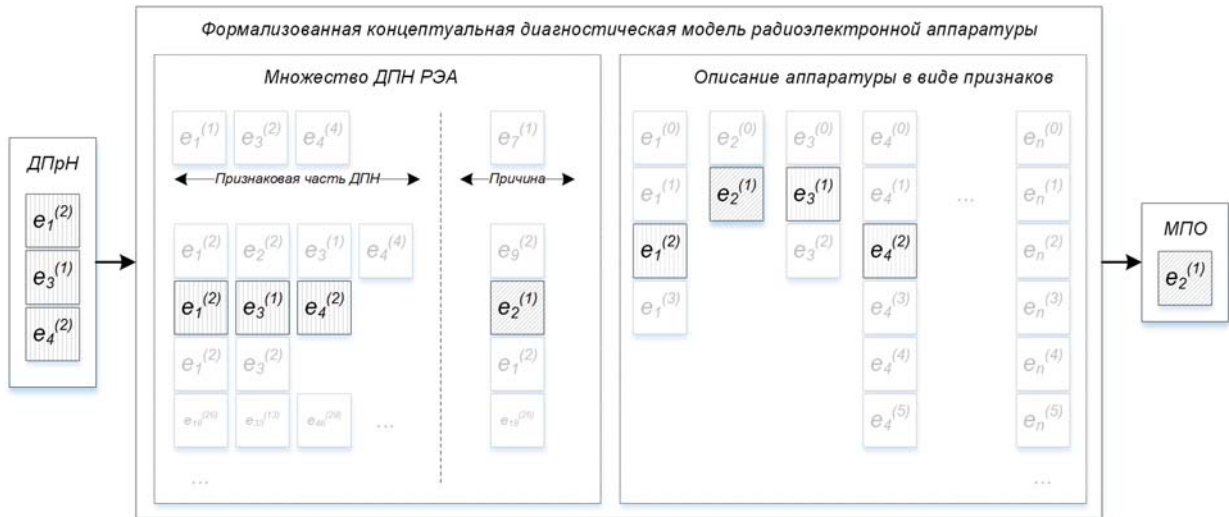
С точки зрения выполнения операции локализации отказа, технический диагноз, получаемый таким образом, характеризует вероятное место и причину отказа [18, 19]. Для уточнения технического диагноза необходимо расширить или изменить множество диагностических признаков неисправностей, связывая это с выполнением различных проверок на аппаратуре либо с использованием дополнительных источников диагностической информации. В результате может быть составлен уточняющий запрос на ЕПЯ, учитывающий получаемую дополнительную диагностическую информацию. Такими итеративными действиями производится уточнение технического диагноза вплоть до нахождения истинной причины и места возникновения неисправности в аппаратуре.

Данный подход к формированию ДДЗ в виде формальных условий для определения МПО по ФКДМ РЭА может находить практическое применение в СА процесса диагностирования. Так, для определения вероятных места и причины неисправности в аппаратуре АППР 83ФБЕ2 предполагается, что обслуживающий персонал может сформулировать следующий запрос к СА на естественном языке: «Почему на панели контейнера Ф3Е2 не светятся индикаторы "27 В" и "400Гц 220 В а, б, с"». Результатом синтаксического анализа данного запроса выступает структура вида:

$Query = [IPW] <на панели контейнера Ф3Е2 не светятся индикаторы 27В>$

$<ConUn> <на панели контейнера Ф3Е2 не светятся индикаторы 400 Гц 220 В а, б, с>$ ,

что означает, что в запросе содержатся два свойства, описывающие нарушения в аппаратуре.



Сущность выборки диагностической информации в ФКДМ РЭА

Действия по распознаванию семантического шаблона каждой фразы запроса в качестве результата возвращает в данном случае следующие формальные конструкции:

$$Prop_1 = e_8 r_2 e_{42}^{(1)}, e_8 \in E_s, e_{42} \in E_f;$$

$$Prop_2 = e_9 r_2 e_{42}^{(1)}, e_9 \in E_s, e_{42} \in E_f;$$

где  $e_8$  – элемент структуры «индикатор 27 В»;

$e_9$  – элемент структуры «индикатор 400 Гц 220 В а, б, с»;

$e_{42}^{(1)}$  – нарушение функциональной задачи «не светится»;

$r_2$  – отношение, характеризующее предикат «выполнять/не выполнять функциональную задачу».

В данном случае оба свойства  $Prop_1$  и  $Prop_2$  относятся к шаблону 12 типа и не требуют разрешения неоднозначностей, а все элементы, имеющиеся в описании этих свойств, представлены в ФКДМ РЭА.

В качестве конечной формальной конструкции, определяющей критерий  $K_{ТД}$  в данном примере, выступает выражение следующего вида:

$$DDQ = e_8 r_2 e_{42}^{(1)} \cup e_9 r_2 e_{42}^{(1)}, \quad (4)$$

где  $DDQ$  – дескриптивный диагностический запрос.

В случае использования таблицы неисправностей аппаратуры АППР 83Ф6Е2 [20] в качестве источника сведений о неисправностях РЭА в качестве ответа на запрос вида (4) может выступать выражение  $МПО = e_{88}^{(23)}$ , где элемент описания  $e_{88}$  соответствует структурному компоненту «предохранитель Пр1», а верхний индекс «23» указывает на порядковый номер дефекта данного компонента – «перегорел». Таким образом, имеется причинно-следственная связь вида «если на панели контейнера ФЗЕ2 не светятся индикаторы "27В" и "400Гц 220В а, б, с", то причиной является перегоревший предохранитель Пр1».

Такое предложение имеется в эксплуатационной документации на аппаратуру АППР 83Ф6Е2 в виде строки таблицы неисправностей на естественном языке и представляет собой ДПН, который в ФКДМ РЭА представлен формальной записью вида:

$$e_8 r_2 e_{42}^{(1)} \cup e_9 r_2 e_{42}^{(1)} \leftrightarrow e_{88}^{(42)}.$$

Представленный подход к формированию дескриптивных диагностических запросов сочетает в себе два аспекта: формальный и языковой. Формальный аспект, отраженный выше, создает основу для использования формализованного многоаспектного представления исправной и неисправной аппаратуры, выступающего в качестве модельного информационного ресурса, устанавливающего взаимосвязь между формальными конструкциями и понятиями предметной области, выраженной на естественном языке. Эта взаимосвязь отражает языковой аспект представленного подхода, и развитие этого аспекта состоит в переходе к естественно-подобному языку  $Я_{ДДЗ}$  дескриптивных диагностических запросов, обеспечивающему формирование ДДЗ в конструкциях естественного языка.

Разновидность используемых языковых конструкций определяется многообразием диагностической информации, используемой в действиях обслуживающего персонала при диагностировании. На основе анализа большого числа типовых неисправностей аппаратуры АППР 83Ф6Е2 разработан естественно-подобный язык  $Я_{ДДЗ}$ , с помощью которого имеется возможность формулировать критерии для определения ТД в предложениях запросов в конструкциях естественного языка. Примерами простых запросов на этом языке, затрагивающих один ДПРН, являются конструкции, приведенные в табл. 1. В языке допускаются сложные запросы, которые могут содержать несколько ДПРН, объединяемых с помощью соединительных союзных слов (ConUn). Примером сложного запроса, созданных в предлагаемом языке, является следующее предложение: «Почему двигатели гироскопа не двигаются, если сигнал Пуск в норме».



Разработана формальная грамматика предлагаемого языка Я<sub>ДДЗ</sub>, которая определена в виде совокупности правил, основные из которых представлены ниже в форме Бекуса-Наура:

*Query* = [*IPW*] *ПризнЧ\_ДПН*  
*ПризнЧ\_ДПН* = *Prop* {*ConUn Prop*}  
*ConUn* = ('*причем*' | '*если*' | '*а также*' | '*кроме того*' ...)  
*IPW* = ('*почему*' | '*куда*' | '*что случилось*' ...)  
*Prop* = *Объект ТипОтношения Признак*  
*Объект* = *СтрКомп* | *Функция* | *Параметр* | *ЦепьСигнала*  
*ТипОтношения* = *ОтнТ1* | *ОтнТ1Обр* | *ОтнТ2* | *ОтнТ2обр* | *ОтнТ3* ...  
*ОтнТ1* = '*входит в*' | '*является частью*' | '*входящий в*' | '*являющийся частью*' ...  
*ОтнТ1Обр* = '*содержит*' | '*включает в себя*' | '*содержащий*' | '*включающий в себя*'  
*ОтнТ2* = ...  
*Признак* = *СтрКомп* | *Функция* | *Параметр* | *ЦепьСигнала*  
*СтрКомп* = *ТипСтрКомп* [*СтрКомпПолнИмя* | *СтрКомпОтобразИмя*] [*Дефект*]  
*ТипСтрКомп* = '*ячейка*' | '*блок*' | '*индикатор*' | '*панель*' | '*гнездо*' ...  
*Дефект* = *ДефектОбщ* | *ДефектЧастн*  
*ДефектОбщ* = '*проблема*' | '*неисправность*' | '*поломка*' | '*отказ*' ...  
*Функция* = (*Дисф* [*ФункцПрефикс*] [*ФункцПолноеИмя* | *ФункцОтобразИмя*]) | ([*ФункцПрефикс*] [*ФункцПолноеИмя* | *ФункцОтобразИмя*] *Дисф*)  
*ФункцПрефикс* = '*работа*' | '*функционирование*' | '*выполнение*' | '*формирование*'  
*Дисф* = *ДисфОбщ* | *ДисфЧастн*  
*ДисфОбщ* = '*не включается*' | '*не вращается*' | '*не горит*' | '*не светится*' ...  
*Параметр* = (*ПарамПодтип* | '*параметр*' | '*величина*') [*ПарамПолноеИмя* | *ПарамСокращИмя*] ('*составляет*' | '*равна*' | '*равняется*' | '*превышает*' | '*не превышает*') [*ПарамНарушОбщ* | *НоминЗначение* | *ПарамНарушЧастн*]  
*ПарамПодтип* = '*напряжение*' | '*ток*' | '*сопротивление*' ...  
*ПарамНарушОбщ* = '*отсутствует*' | '*ниже нормы*' | '*выше нормы*' | '*не в норме*' ...  
*НоминЗначение* = *НоминЗначениеОбщ* | *НоминЗначениеЧастн*  
*НоминЗначениеОбщ* = '*в норме*' | '*в допуске*' | '*правильное*' | '*верное*' | '*корректное*'  
*НоминЗначениеЧастн* = (*Число* *Размерность* [*Допуск*]) | ('*от*' *МинЧислЗнач* [*Размерность*] '*до*' *МаксЧислЗнач* *Размерность*) | *СпецЗнач*

Разработанная грамматика с точки зрения построения систем поддержки принятия решений при техническом диагностировании (СППР ТД) выступает в качестве формализованной основы для формирования ДДЗ на естественно-подобном языке Я<sub>ДДЗ</sub>. Это создает предпосылки для реализации голосовых интерфейсов в запросных механизмах СППР ТД, что обеспечивает повышение уровня автоматизации средств информационной поддержки ОП.

## Заключение

Новизна предложенного подхода состоит в том, что он основан на согласовании формализованной концептуальной диагностической модели РЭА и языковых средств формирования запросов, что позволяет в СППР ТД определять критерий выбора технического диагноза на естественно-подобном языке.

Характеризуя прикладной характер предложенного подхода, следует отметить, что использование голосовых естественно-языковых средств, при информационной поддержке процесса определения технического диагноза неисправностей РЭА в целом способствует сокращению времени диагностирования аппаратуры и повышению эффективности использования средств автоматизации при восстановлении сложных технических комплексов.

## Литература

1. Брускин С.Н., Дружбаев А.А., Марон А.И., Марон М.А. Эффективные методы построения алгоритмов поиска неисправностей в информационных системах // Интеллектуальные системы в производстве. 2017. № 3. С. 88-93. DOI:10.22213/2410-9304-2017-3-88-93
2. Дрозд О.В. Формирование единого информационного пространства поддержки проектирования радиоэлектронной аппаратуры // Сборник тезисов участников форума «Наука будущего - наука молодых» (Нижний Новгород, 12 сентября 2017 г.). Нижний Новгород, 2017. С. 302-303.
3. Vassyl Ravluyk, I. Derevianchuk, I. Afanasenko, N. Ravluyk. Development of electronic diagnostic system for improving the diagnosis reliability of passenger car brakes // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Pp. 35-41. DOI:10.15587/1729-4061.2016.66007.
4. Vitalij Nichoha; Volodymyr Storozh; Yuriy Matiieshyn. Results of the development and research of information-diagnostic system for the magnetic flux leakage defectoscopy of rails. 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET). 2020. Pp. 852-857. DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235557.
5. Анисимов О.В., Курчидис В.А., Яценко А.В. Формирование диагностической информации в форме элементов диагностических данных о радиоэлектронной аппаратуре // Материалы докладов XXIV Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию Нижегородской радиолaborатории «Информационные системы и технологии ИСТ-2018» (Нижний Новгород, 20 апреля 2018 г.). Нижний Новгород, 2018. С. 4-9.
6. Куроедов С.К., Светлов А.В., Смогунов В.В. Диагностические модели электрических цепей с сосредоточенными параметрами // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2019. № 4 (52). С. 63-76. doi:10.21685/2072-3059-2019-4-5.
7. Спасёнов А.Ю., Кучеров К.В., Волосатова Т.М. Использование метода структурно-модального анализа многомерных временных рядов для оценки состояния сложных технических объектов // Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана. 2020. №8. С. 50-54.
8. Анисимов О.В., Попов Т.А. Концептуальное представление электрических схем радиоэлектронной аппаратуры на основе фреймовой модели // Вестник Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны. 2016. № 1. С. 22–26.
9. Бибилов С.В., Калинин С.В., Обухов А.В. Концептуально-ориентированная методика исследования предметной области при проектировании информационных систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 12-2. С. 380-391.

10. Долятовский В.А., Гамалей Я.В. Онтологический подход к процессам и системам обучения и образования // Образовательные технологии (г. Москва). 2018. № 3. С. 76-106.

11. Гвоздевский И.Н., Методы представления данных для использования в распределенных информационных системах на основе онтологий // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 4. С. 155-159.

12. Бова В.В., Лецанов Д.В. Семантический поиск знаний в среде функционирования междисциплинарных информационных систем на основе онтологического подхода // Искусственный интеллект и нечеткие системы. 2017. № 7. С. 79-90.

13. Курченко С.И., Курчидис В.А., Назанский А.С. Формализованное концептуальное представление структурного аспекта процесса оперативного восстановления изделий сложных технических комплексов // Радиотехнические системы. Материалы международной молодежной научно-практической конференции. 2020. С. 187-194.

14. Анисимов О.В., Курчидис В.А. Формирование диагностической информации в виде фрагментов электрических схем радиоэлектронной аппаратуры // Труды МАИ. 2017. № 94. 17 с.

15. 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 // Путь в науку. Радиотехнические системы. Ярославский гос. университет им. П.Г. Демидова. 2018. С. 152-159.

16. Рогошина Ю.В. Разработка распределённых интеллектуальных систем на основе онтологического анализа и семантических wiki-технологий // Онтология проектирования. 2017. С. 453-472.

17. Кравченко Ю.А., Курсытыс И.О., Кулиев Э.В., Разработка генетического алгоритма расчета семантической близости в задачах управления знаниями // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 6 (179). С. 75-87.

18. Сладкова Л.А., Неклюдов А.Н., Лавриненко В.Ю. Конструктивное решение и методика исследования нагруженности колёсных пар // Российский университет транспорта. 2019. № 6 (85). С. 74-81.

19. Lin Xie, Solfrid Habrekke, Yiliu Liu, Mary Ann Lundteigena, Operational data-driven prediction for failure rates of equipment in safety instrumented systems: A case study from the oil and gas industry // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2019. V. 60, Pp. 96-105.

20. БИК2.008.209 ИЭ. Изделие 83Ф6. Инструкция по эксплуатации.

## FORMATION OF DESCRIPTIVE DIAGNOSTIC REQUESTS FOR TECHNICAL DIAGNOSTICS OF ELECTRONIC EQUIPMENT

**VIKTOR A. KURCHIDIS**

Yaroslavl, Russia, idahmer2@yandex.ru

**OLEG V. ANISIMOV**

Yaroslavl, Russia, qwaker@inbox.ru

**ALEXEY YU. PUGACHEV**

Yaroslavl, Russia, nil.vko@gmail.com

**KONSTANTIN A. PUSHKIN**

Yaroslavl, Russia, kontsnatinpush@gmail.com

### ABSTRACT

Restoration of the serviceable state of complex technical systems is associated with technical diagnostics, the purpose of which is to determine the locations and causes of the malfunction. Improving the efficiency of diagnostics can be achieved through the use of automated information support tools that provide maintenance personnel with the required diagnostic information based on the generated request. The use of language query tools in systems of this type allows service personnel to formulate query conditions more precisely and specifically, but such tools require the development of additional models for interpreting conditions presented in natural language constructs. The purpose of the work is to develop a formal model that reflects the structure and rules for the formation of language queries in which diagnostic features are determined. The goal is achieved by consistently describing the procedures that determine the lexical, syntactic and semantic rules for analyzing language requests of service personnel to an automated information support system. The given sequence of language analysis proce-

**KEYWORDS:** *electronic equipment; technical diagnostics; diagnostic models; formalized conceptualization; semantic templates.*

dures provides for the selection in the language requests of the service personnel of a formal set of diagnostic features that are used to form a formal request to an information source of information about faults in electronic equipment. It is shown that the machine parsing of such queries, which are called descriptive diagnostic queries in this work, is expedient to be performed by identifying the correspondence of language constructions to a set of formal rules determined by the grammar of a natural-like language. The studies carried out confirm the possibility and create conditions for the inclusion of inquiry-response means into automated information support systems for technical diagnostics and repair, which ensure the formation of probable places and causes of faults in radio electronic equipment at the request of the service personnel, made in the designs of the natural (Russian) language. The introduction of such a mechanism into automated systems will reduce the number of non-productive losses that are not directly related to diagnostics, which will have a positive effect on the time indicators of the restoration of complex technical complexes.

## REFERENCES

1. Bruskin S.N., Druzhaev A.A., Maron A.I., Maron M.A. Jeffektivnye metody postroeniya algoritmov poiska neispravnostej v informacionnyh sistemah [Effective methods for creation of malfunctions search algorithms in information systems]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve* [Intelligent systems in production]. 2017. No. 3. P. 88-93. DOI:10.22213/2410-9304-2017-3-88-93. (In Rus)
2. Drozd O.V. Formirovanie edinogo informacionnogo prostranstva podderzhki proektirovaniya radioelektronnoj apparatury .[Formation of a unified information space for supporting the design of electronic equipment]. *Sbornik tezisov uchastnikov foruma "Nauka budushhego - nauka molodyh"* [Collection of abstracts of the participants of the forum "Science of the Future - Science of the Young", Nizhnij Novgorod, on September 12, 2017]. Nizhnij Novgorod, 2017. P. 302-303 (In Rus)
3. Vassyl Ravluyk, I. Derevianchuk, I. Afanasenko, N. Ravluyk. Development of electronic diagnostic system for improving the diagnosis reliability of passenger car brakes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. P. 35-41. DOI:10.15587/1729-4061.2016.66007.
4. Vitalij Nichoha; Volodymyr Storozh; Yuriy Matiieshyn. Results of the development and research of information-diagnostic system for the magnetic flux leakage defectoscopy of rails. *2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*. 2020. P. 852-857. DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235557.
5. Anisimov O.V., Kurchidis V.A., Jashhenko A.V. Formirovanie diagnosticheskoy informacii v forme jelementov diagnosticheskikh dannyh o radioelektronnoj apparature [Formation of diagnostic information in the form of elements of diagnostic data on electronic equipment]. *Materialy dokladov XXIV Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, posvjashhennoj 100-letiju Nizhegorodskoj radiolaboratorii "Informacionnye sistemy i tehnologii IST-2018"* [Proceedings of the XXIV International Scientific and Technical Conference dedicated to the 100th anniversary of the Nizhny Novgorod Radio Laboratory "Information Systems and Technologies IST-2018"]. Nizhnij Novgorod, 2018. P. 4-9 (In Rus)
6. Kuroedov S.K., Svetlov A.V., Smogunov V.V. Diagnostic models of electric circuits with lumped parameters. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region. Tehnicheskie nauki*. [Items of higher educational institutions. Volga region. Technical science]. 2019. No. 4 (52). P. 63-76. doi:10.21685/2072-3059- 2019-4-5. (In Rus)
7. Spasjonov A.Ju., Kucherov K.V., Volosatova T.M. Ispol'zovanie metoda strukturno-modal'nogo analiza mnogomernyh vremennyh rjadov dlja ocenki sostojanija slozhnyh tehniceskikh ob'ektov [Monitoring and diagnostics of complex technical systems using structurally modal analysis of multidimensional time series]. *Moskovskij gosudarstvennyj tehniceskij universitet imeni N.Je. Baumana* [Bauman Moscow State Technical University]. 2020. No. 8. P. 50-54. (In Rus)
8. Anisimov O.V., Popov T.A. Conceptual representation of electrical circuits of radio electronic equipment based on the frame model. *Vestnik Jaroslavskogo vysshhego voennogo uchilishha protivovozdushnoj oborony* [Bulletin of the Yaroslavl Higher Military School of Air Defense]. 2016. No. P. 22-26. (In Rus)
9. Bibikov S.V., Kalinichenko S.V., Obuhov A.V. Conceptually-oriented methodology for researching a subject area in the design of information systems. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universite-*
- ta. Tehnicheskie nauki*. [Bulletin of the Tula State University. Technical science]. 2017. No.12(2). P. 380-391. (In Rus)
10. Doljatovskij V.A., Gamalej Ja.V. Ontological approach to the processes and systems of learning and education. *Obrazovatel'nye tehnologii* [Educational technologies]. 2018. No. 3. P. 76-106. (In Rus)
11. Gvozdevskij I.N. Methods of data representation for use in distributed information systems based on ontologies. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova*. [Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov]. 2017. No. 4. P. 155-159. (In Rus)
12. Bova V.V., Leshchanov D.V. Semanticheskij poisk znanij v srede funkcionirovaniya mezhdisciplinarnyh informacionnyh sistem na osnove ontologicheskogo podhoda [The semantic search of knowledge in the environment of operation of interdisciplinary information systems based on ontological approach]. *Iskusstvennyj intellekt i nechetkie sistemy* [Artificial intelligence and fuzzy systems]. 2017. No. 7. P. 79-90.
13. Kirichenko S.I., Kurchidis V.A., Nazanskij A.S. Formalizovannoe konceptual'noe predstavlenie strukturnogo aspekta processa operativnogo vosstanovlenija izdelij slozhnyh tehniceskikh kompleksov [Formalized conceptual representation of the structural aspect of the process of operational restoration of products of complex technical complexes]. *Radiotehnicheskie sistemy. Materialy mezhdunarodnoj molodjozhnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Radio engineering systems. Materials of the international youth scientific-practical conference]. Yaroslavl. 2020. P. 187-194. (In Rus)
14. Anisimov O., Kurchidis V., Popov T. Formirovanie diagnosticheskoy informacii v vide fragmentov jelektricheskikh shem radioelektronnoj apparatury [Diagnostic information formation in the form of electronic equipment electrical circuits' fragments]. *Trudy "MAI"* [Works of MAI]. 2017. No. 94. P. 20-28.
15. 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]. *Put' v nauku. Radiotehnicheskie sistemy. Materialy konferencii. Jaroslavskij gos. universitet im. P.G. Demidova* [The path to science. Radio engineering systems. Conference materials. Yaroslavl State University named after P.G. Demidov]. Yaroslavl. 2018. P. 152-159. (In Rus)
16. Rogushina Ju.V. Razrabotka raspredeljonnyh intellektual'nyh sistem na osnove ontologicheskogo analiza i semanticheskikh wiki-tehnologii [V. Development of distributed intelligent systems on base of ontological analysis and semantic wiki technologies]. *Ontologija proektirovaniya* [Ontology of designing]. 2017. No. 7(4). P. 453-472. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-4-453- 472. (In Rus)
17. Kravchenko Ju.A., Kursity I.O., Kuliev Je.V., Razrabotka geneticheskogo algoritma rascheta semanticheskoy blizosti v zadachah upravlenija znanijami [The development of genetic algorithm for semantic similarity estimation in terms of knowledge management problems]. *Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki* [Izvestia SFedU. Technical science]. 2016. No. 6 (179). P. 75-87. (In Rus)
18. Sladkova L.A., Nekljudov A.N., Lavrinenko V.Ju. Konstruktivnoe reshenie i metodika issledovanija nagruzhennosti koljosnyh par [Constructive solution and methods for studying the loading of wheelsets]. *Mir transporta* [World of Transport and Transportation Journal (E-Journal - Moscow State University of Railway Engineering, MIIT)]. 2019. No. 6 (85). P. 74-81. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-74-81>. (In Rus)

19. Lin Xie, Solfrid Habrekke, Yiliu Liu, Mary Ann Lundteigena, Operational data-driven prediction for failure rates of equipment in safety instrumented systems: A case study from the oil and gas industry. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019. Vol. 60. P. 96-105.

20. YK2.008.209 IJe. Izdelie 83F6E2. Instrukcija po jekspluataciji. [Product 83F6E2. User's manual]. (In Rus)

**INFORMATION ABOUT AUTHORS:**

**Kurchidis V. A.**, PhD, Full Professor, Professor of the Yaroslavl Higher Military College Of Anti-Air Defense.

**Anisimov O. V.**, PhD, Full Professor, Professor of the Yaroslavl Higher Military College Of Anti-Air Defense.

**Pugachev A. Y.**, PhD, Deputy Head of the Science Research Division of the Yaroslavl Higher Military College Of Anti-Air Defense.

**Pushkin K.A.**, Head of the Research Laboratory of the Yaroslavl Higher Military School of Air Defense.

**For citation:** Kurchidis V.A., Anisimov O.V., Pugachev A.Y., Pushkin K.A., Formation of descriptive diagnostic requests for technical diagnostics of electronic equipment. *H&ES Research*. 2021. Vol. 13. No. 4. Pp. 28-36. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-4-28-36 (In Russian)

The poster features a dark blue background with a red vertical band on the left. At the top left, there is a logo of a stylized 'Y' and the text 'Интеллектуальные транспортные системы России'. Below this, it says '6-й форум и выставка'. The main title 'ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ РОССИИ' is in large white letters, followed by 'ЦИФРОВАЯ ЭРА ТРАНСПОРТА' in smaller white letters. The date '5-6.10.2021' is prominently displayed in white and red, with 'Москва' below it. The location 'Азимут Отель Олимпик (Олимпийский Проспект 18/1)' is listed. Contact information includes the phone numbers '8 495 766 51 65' and '8 964 522 09 86', and the email 'info@itsrussiaforum.ru' and website 'www.itsrussiaforum.ru'. On the right side, there is a logo for 'Ассоциация ЦИФРОВАЯ ЭРА ТРАНСПОРТА' and a key event description: 'Ключевое событие в области цифровизации транспортного комплекса.' Below this, a paragraph describes the forum's focus on digital transport development, V2X technologies, and autonomous vehicles. Another paragraph mentions the participation of federal authorities and technology providers. A final paragraph notes that the exhibition will showcase real technological solutions in IT and digital infrastructure. At the bottom right, there is a '6+' age rating and the word 'реклама'.



doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-4-37-47

# УПРАВЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ПЕРСОНАЛЬНЫХ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

**БОЛЬШАКОВ**

**Александр Сергеевич<sup>1</sup>**

**ЖИЛА**

**Анастасия Игоревна<sup>2</sup>**

**ОСИН**

**Андрей Владимирович<sup>3</sup>**

## АННОТАЦИЯ

**Введение:** для обеспечения необходимого уровня безопасности персональных данных в компьютерных системах целесообразно создать систему управления информационной безопасностью, которая бы позволяла помогать выбирать защитные меры при определенных входных данных. **Цель исследования:** разработка алгоритма модели защиты персональных данных, позволяющий учитывать совокупность входных факторов на принятие решений по обеспечению информационной безопасности. **Методы:** в качестве математического аппарата для описания подобной ситуации предлагается применить аппарат нечеткого вывода. Основным преимуществом применения данного математического подхода в моделировании системы управления является описание условий и методов решения задач в условиях неопределённости. **Результаты:** при построении системы управления информационной безопасностью был определен набор правил и исследовано влияние изменения входных переменных на комплекс защитных мер. Разработанная на основе данного алгоритма модель с использованием нечеткого вывода идентифицирует влияние угроз информационной безопасности на принятие решений о выборе мер по защите персональных данных в компьютерной системе. Результатом моделирования угроз также являются плоскости, иллюстрирующие взаимосвязь входных и выходных параметров модели. Данные плоскости позволяют определить управленческое решение о выборе мер в зависимости от значений выбранных параметров. В работе предложено три порога значений каждой из защитных мер, которые определяют необходимость в используемых мерах по нейтрализации смоделированных угроз. Влияние входных переменных на выходные значения построенной модели было идентифицировано изменением распределения термов функций принадлежности входных параметров, изменение которых может существенно влиять на итоговое решение по управлению информационной безопасностью. **Обсуждение:** результаты работы указывают на необходимость адекватного описания как входных переменных, так и реагирования выходных переменных модели на входные переменные с целью принятия эффективных мер для защиты информации.

## Сведения об авторах:

<sup>1</sup> доцент, преподаватель Московского Технического Университета Связи и Информатики, г. Москва, Россия, as.bolshakov57@mail.ru

<sup>2</sup> магистр Московского Технического Университета Связи и Информатики, г. Москва, Россия, ai.zhila@yandex.ru

<sup>3</sup> доцент, преподаватель Московского Технического Университета Связи и Информатики, г. Москва, Россия, osin\_a\_v@mail.ru

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** защита персональных данных, информационная система персональных данных, управление информационной безопасностью, нечеткая логика, модель нечеткого вывода.

---

**Для цитирования:** Большаков А. С., Жила А. И., Осин А. В. Управление информационной безопасностью персональных данных с использованием нечеткой логики // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 4. С. 37-47. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-4-37-47

### Введение

Поскольку информационная система персональных данных – это не только совокупность персональных данных содержащихся в базах данных, но и обеспечивающих их обработку информационных технологий, технических средств и пользователей системы, то необходим комплексный подход к обеспечению безопасности персональных данных. Такой подход включает в себя как подготовку, разработку и внедрение математической модели, так и соответствующее организационное и нормативно-регламентное обеспечение. Это, в свою очередь, является сложной, слабо структурируемой и трудно формализуемой задачей. Для реализации комплексного подхода необходимо определить угрозы информационной безопасности информационных систем, установить взаимосвязи источников угроз и уязвимостей, из которых определяются возможные последствия реализации угроз. Такой подход позволит показать многогранность угроз и многоаспектность защитных мер, необходимых для создания комплексной системы защиты персональных данных. Целесообразность использования нечеткой логики в качестве математического аппарата в задачах управления информационной безопасностью подтверждена многими современными работами [1-6]. Для описания угроз персональных данных и разработки модели системы защиты персональных данных в качестве основополагающих документов будут использоваться нормативные документы федерального органа России ФСТЭК.

### Построение системы управления защитными мерами

Систему управления информационной безопасностью в разрабатываемой модели защиты персональных данных можно представить в виде функциональной схемы, представленной на рисунке 1, в которой управление информационной безопасностью будет происходить по правилам нечеткой логики.

Алгоритм, разрабатываемый в данной работе, представляет собой набор правил на основе нечеткой логики, связывающий входные параметры, характеризующих реализацию угроз безопасности персональных данных, и выходные параметры модели в виде организационных и технических мер по защите. Данная модель идентифицирует влияние угроз информационной безопасности на принятие решений о выборе мер по защите персональных данных в компьютерной системе и является модулем системы поддержки принятия решений [7].

Численные значения входных параметров характеризуют реализацию угроз информационной безопасности, определяя конкретный тип лингвистической переменной из множества, принадлежащее каждому из параметров. Численные значения выходных параметров соответствуют уровням мер по защите информации, полученных с помощью моделирования нечеткого вывода. На основании соответствующих уровней выходных переменных принимается решение о том, какие меры стоит принимать для нейтрализации смоделированных сценариев угроз.

### Формирование параметров модели нечеткого вывода

Для идентификации влияния угроз информационной безопасности на выбор мер по защите персональных данных с использованием нечеткой логики необходимо определить угрозы безопасности персональных данных для конкретного типа ИСПДн.

Сочетание условий и факторов, создающих потенциальную опасность нарушения информационной безопасности персональных данных, формируется с учетом характеристик информационной системы, содержащих защищаемую информацию, и особенностей источников угрозы. Моделирование угроз будет происходить в соответствии с базовой моделью угроз ФСТЭК [8].

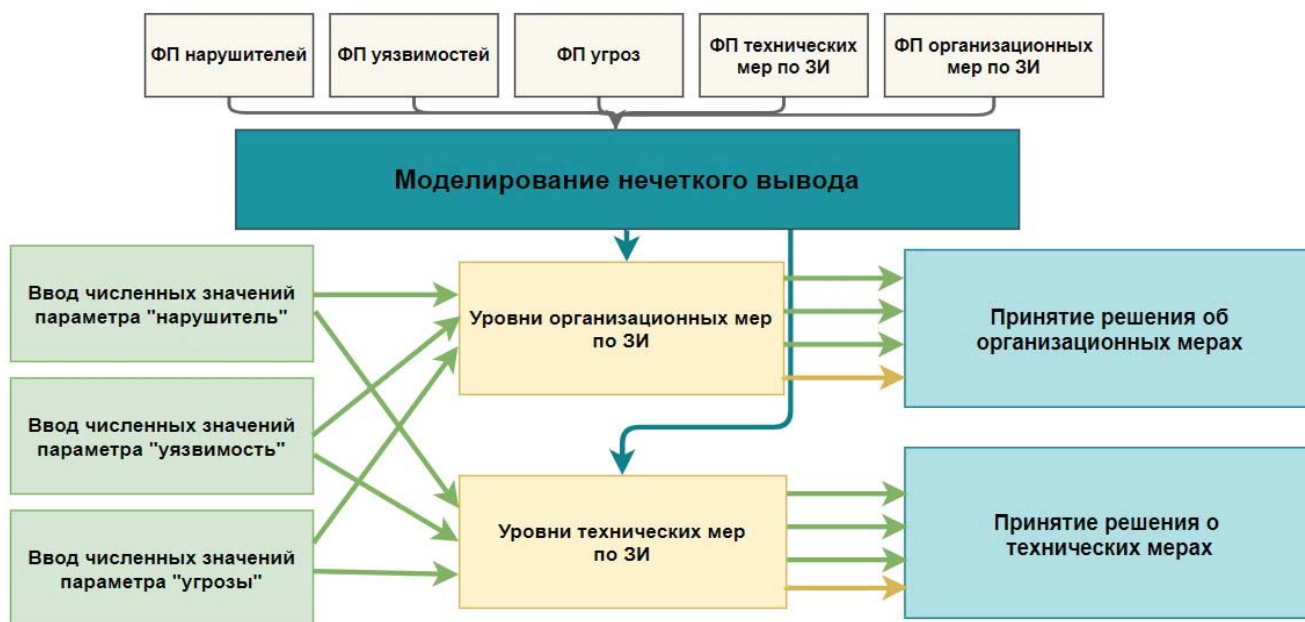


Рис. 1. Функциональная схема разрабатываемой системы управления информационной безопасностью

На практике, при составлении частных моделей угроз, безопасности для ИСПДн выявленные угрозы, представленные на рисунке 2, являются актуальными [9-10].



Рис. 2. Результат анализа актуальных угроз ИСПДн

Для построения модели защиты информации необходимо иметь представление о механизмах нарушения свойств информации в ИСПДн. А именно, раскрыть содержание «цепочки»: «угроза» = «нарушитель» – «уязвимость» – «защищаемый ресурс» + «инцидент ИБ и описать сопутствующие уязвимости [11] (табл. 1).

Таблица 1

Описание угроз ИБ разрабатываемой модели

Нарушитель	Угроза ИБ	Уязвимость
Внешний злоумышленник	Выявление паролей	Простой пароль в системе
	Несанкционированный доступ к информации	Отсутствие разграничения доступа
	Несанкционированное изменение, копирование информации	Отсутствие разграничения прав
	Кража носителей информации	Отсутствие учета носителей информации
	Внедрение вредоносного кода	Отсутствие антивирусной защиты
	Системные сбои	Отсутствие резервной копии
Персонал ИСПДн	Ошибочные действия	Отсутствие контроля действий пользователей
	Несанкционированное изменение, копирование информации	Отсутствие разграничения прав
	Несанкционированный доступ к информации	Отсутствие разграничения доступа
	Установка несогласованного ПО	Отсутствие контроля действий пользователей
	Системные сбои	Отсутствие резервной копии
	Выявление паролей	Отсутствие разграничения доступа
	Кража носителей информации	Отсутствие учета носителей информации

В соответствии с требованиями ФСТЭК от 18 февраля 2013 №21 составим таблицу организационных и технических мер защиты персональных данных, которые необходимо выполнять.

Таблица 2

Описание технических и организационных мер защиты информации

Организационные меры	Технические меры
Идентификация и аутентификация субъектов доступа и объектов доступа (ИАФ)	Защита технических средств (ЗТС)
Обеспечение целостности информационной системы и персональных данных (ОЦД)	Ограничение программной среды (ОПС)
Контроль безопасности персональных данных (АНЗ)	Управление доступом субъектов доступа к объектам доступа (УПД)
	Антивирусная защита (АВЗ)
	Обеспечение доступности персональных данных (ОДТ)
	Защита машинных носителей (ЗНИ)
	Управление конфигурацией информационной системы (УКФ)

### Моделирование нечеткого вывода

При построении модели на основе нечеткой логики каждый входной и выходной параметр представляют собой лингвистическую переменную, значениями которой являются слова естественного языка. [12] Это множество значений является терм-множеством лингвистической переменной. Элементы этого множества – термы, которые формализуются нечетким множеством с помощью функции принадлежности в шкале [0,1], т.е. степенью принадлежности множеству. Несмотря на то, что нечеткие системы могут иметь функции принадлежности произвольной структуры, с практической точки зрения наибольшей популярностью пользуются функции треугольного типа [13-15].

#### 1. Формирование четких переменных.

Переменные описываются в интервале действительных чисел от 0 до 1. Тогда имеем следующие четкие исходные входные переменные:

$$X_1 \in [0,1] \text{ – нарушитель;}$$

$$X_2 \in [0,1] \text{ – угроза ИБ;}$$

$$X_3 \in [0,1] \text{ – уязвимость.}$$

Следовательно, на входе модели имеется исходный четкий вектор  $\{X_1, X_2, X_3\} \in [0,1] \times [0,1] \times [0,1]$ . Множество возможных значений этого вектора представляет собой 3-мерный куб с ребром = 1.

На выходе модели должны формироваться четкие переменные:

$$Y_1 \in [0,1] \text{ – организационные меры по защите;}$$

$$Y_2 \in [0,1] \text{ – технические меры по защите.}$$

Следовательно, на выходе модели имеется исходный четкий вектор  $\{Y_1, Y_2\} \in [0,1] \times [0,1]$ . Множество возможных

значений этого вектора представляет собой 2-мерный квадрат с ребром = 1.

2. *Фазификация входных и выходных переменных (формирование нечетких лингвистических переменных).*

В качестве терм-множества переменной  $X_1$  будем использовать множество  $T_1$  = (внешний злоумышленник, внутренний нарушитель) =  $(T_{1.1}, T_{1.2})$  с функциями принадлежности соответственно  $\mu_{1.1}(X_1) \in [0, 1]$ ,  $\mu_{1.2}(X_1) \in [0, 1]$

Исходя из полученных данных (на рис. 2) процентное соотношение частоты возникновения угроз из общего числа, связанных с внутренним нарушителем, имеет 29%, тогда как связанных с внешним злоумышленником 20%, а 51% угроз связан и с внешним злоумышленником, и с внутренним. Таким образом, входная переменная «Нарушитель» в разрабатываемой модели нечеткой логики будет иметь вид, представленный на рисунке 3.

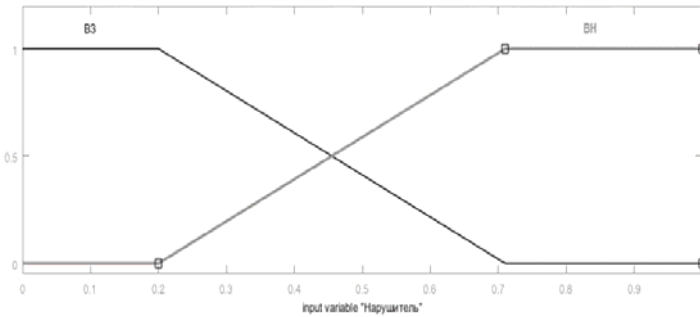


Рис. 3. Описание лингвистической переменной «Нарушитель»

В качестве терм-множества переменной  $X_2$  будем использовать множество  $T_2$  =(системные сбои, ошибочные действия, установка несогласованного ПО, внедрение вредоносного кода, выявление паролей, несанкционированный доступ к информации, несанкционированное изменение и копирование информации, кража носителей информации)=  $(T_{2.1}, T_{2.2}, T_{2.3}, T_{2.4}, T_{2.5}, T_{2.6}, T_{2.7}, T_{2.8})$  с функциями принадлежности соответственно  $\mu_{2.1}(X_2) \in [0, 1]$ ,  $\mu_{2.2}(X_2) \in [0, 1]$ ,  $\mu_{2.3}(X_2) \in [0, 1]$ ,  $\mu_{2.4}(X_2) \in [0, 1]$ ,  $\mu_{2.5}(X_2) \in [0, 1]$ ,  $\mu_{2.6}(X_2) \in [0, 1]$ ,  $\mu_{2.7}(X_2) \in [0, 1]$ ,  $\mu_{2.8}(X_2) \in [0, 1]$ .

Исходя из полученных данных, а именно процентного соотношения частоты возникновения угроз из общего числа, входная переменная «Угроза ИБ» в разрабатываемой модели нечеткой логики будет иметь вид, представленный на рисунке 4.

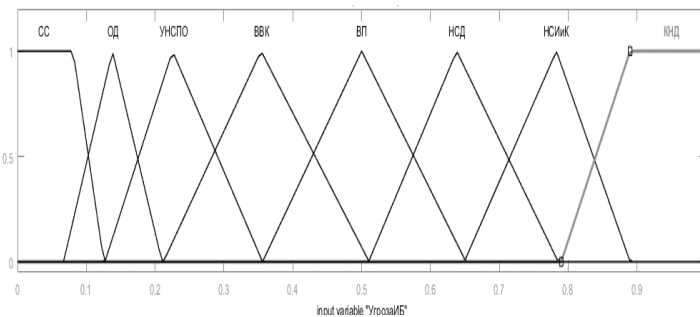


Рис. 4. Описание лингвистической переменной «Угроза ИБ»

В качестве терм-множества переменной  $X_3$  будем использовать множество  $T_3$  = (отсутствие антивирусной защиты, отсутствие резервной копии, отсутствие учета носителей, простой пароль в системе, отсутствие разграничения доступа, отсутствие разграничения прав, отсутствие контроля действий пользователей) =  $(T_{3.1}, T_{3.2}, T_{3.3}, T_{3.4}, T_{3.5}, T_{3.6}, T_{3.7})$  с функциями принадлежности:

$$\mu_{3.1}(X_3) \in [0, 1], \mu_{3.2}(X_3) \in [0, 1], \mu_{3.3}(X_3) \in [0, 1], \mu_{3.4}(X_3) \in [0, 1], \\ \mu_{3.5}(X_3) \in [0, 1], \mu_{3.6}(X_3) \in [0, 1], \mu_{3.7}(X_3) \in [0, 1].$$

Поскольку отсутствуют данные о критичности уязвимостей, они распределены равномерно. Таким образом, входная переменная «Уязвимость» в разрабатываемой модели нечеткой логики будет иметь вид, представленный на рисунке 5.

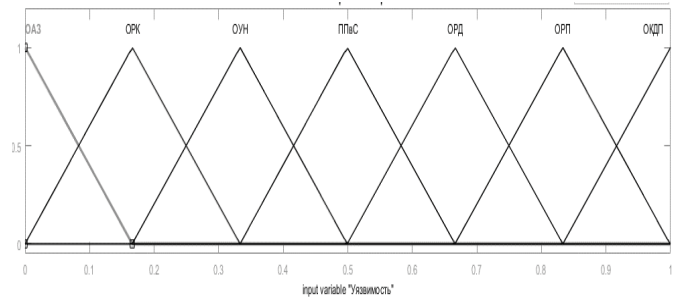


Рис. 5. Описание лингвистической переменной «Уязвимость»

В качестве терм-множества выходной переменной  $Y_1$  будем использовать множество  $T_{Y_1}$  =(идентификация и аутентификация субъектов и объектов доступа, контроль безопасности персональных данных, обеспечение целостности информационной системы и персональных данных) =  $(T_{Y_{1.1}}, T_{Y_{1.2}}, T_{Y_{1.3}})$  с функциями принадлежности :

$$\mu_{Y_{1.1}}(Y_1) \in [0, 1], \mu_{Y_{1.2}}(Y_1) \in [0, 1], \mu_{Y_{1.3}}(Y_1) \in [0, 1].$$

Поскольку отсутствуют данные об эффективности принимаемых мер по отношению к угрозам, уязвимостям и нарушителю, то примем, что они распределены равномерно. Таким образом, выходная переменная «Организационные меры» в разрабатываемой модели нечеткой логики будет иметь вид, представленный на рисунке 6.

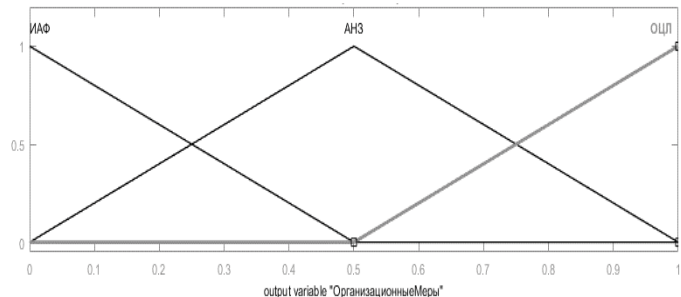


Рис. 6. Описание лингвистической переменной «Организационные меры»



В качестве терм-множества выходной переменной  $Y_2$  будем использовать множество  $T_{Y_2}$  = (обеспечение доступности персональных данных, управление доступом субъектов доступа к объектам доступа, управление конфигурацией информационной системы, защита технических средств, ограничение программной среды, антивирусная защита, защита машинных носителей) =  $(T_{Y_{2,1}}, T_{Y_{2,2}}, T_{Y_{2,3}}, T_{Y_{2,4}}, T_{Y_{2,5}}, T_{Y_{2,6}}, T_{Y_{2,7}})$  с функциями принадлежности:

$$\mu_{Y_{2,1}}(Y_2) \in [0,1], \mu_{Y_{2,2}}(Y_2) \in [0,1], \mu_{Y_{2,3}}(Y_2) \in [0,1],$$

$$\mu_{Y_{2,4}}(Y_2) \in [0,1], \mu_{Y_{2,5}}(Y_2) \in [0,1], \mu_{Y_{2,6}}(Y_2) \in [0,1], \mu_{Y_{2,7}}(Y_2) \in [0,1].$$

Поскольку отсутствуют данные об эффективности принимаемых мер по отношению к угрозам, уязвимостям и нарушителю, то примем, что они распределены равномерно. Таким образом, выходная переменная «Технические меры» в разрабатываемой модели нечеткой логики будет иметь вид, представленный на рисунке 7.

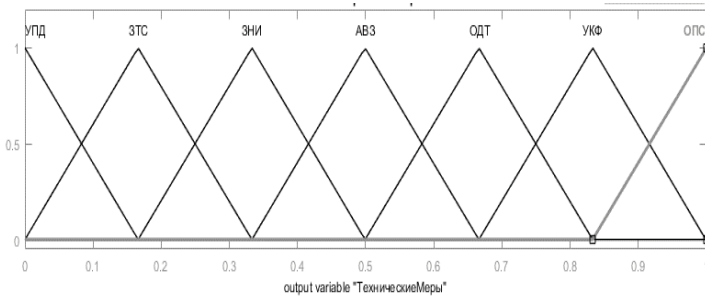


Рис. 7. Описание лингвистической переменной «Технические меры»

### 3. Формирование базы правил системы нечеткого вывода.

Нечеткие правила имеют форму предложений вида: ЕСЛИ «...» И «...» ТОГДА «...» [16], условная часть которых представляет собой выражение нечеткой логики над лингвистическими значениями выбранных критериев и отношениями между ними и составляют конструкцию: *Правило 1: Если «Условие А1» и «Условие В1», тогда «Следствие С1».* Входные переменные описывают условия его применимости, а заключение правила определяет функции принадлежности значений выходных лингвистических переменных.

Для определения базы правил системы необходимо определить организационные и технические меры. Для выбора и оценки эффективности выбранных мер по защите может использоваться метод экспертных оценок, который уточняет выбор в зависимости от характеристик конкретных ИСПДн. Предложенный список мер по устранению каждой из угроз советуем требованием приказа ФСТЭК №21. Сформируем 54 правила нечеткого вывода с соответствующими терм-множествами.

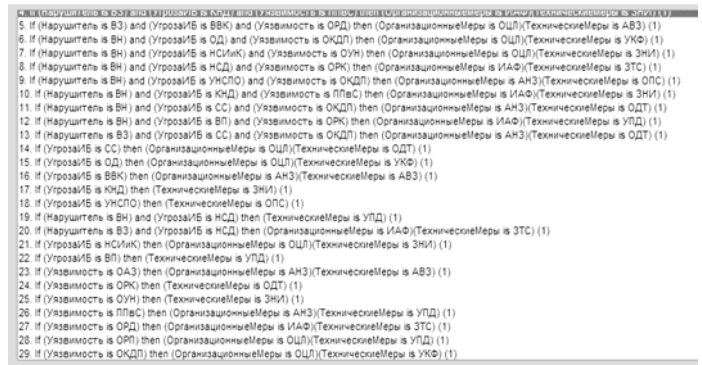


Рис. 8. Сформированные правила нечеткого вывода

На рисунке 9 реализация правил отображается графически.

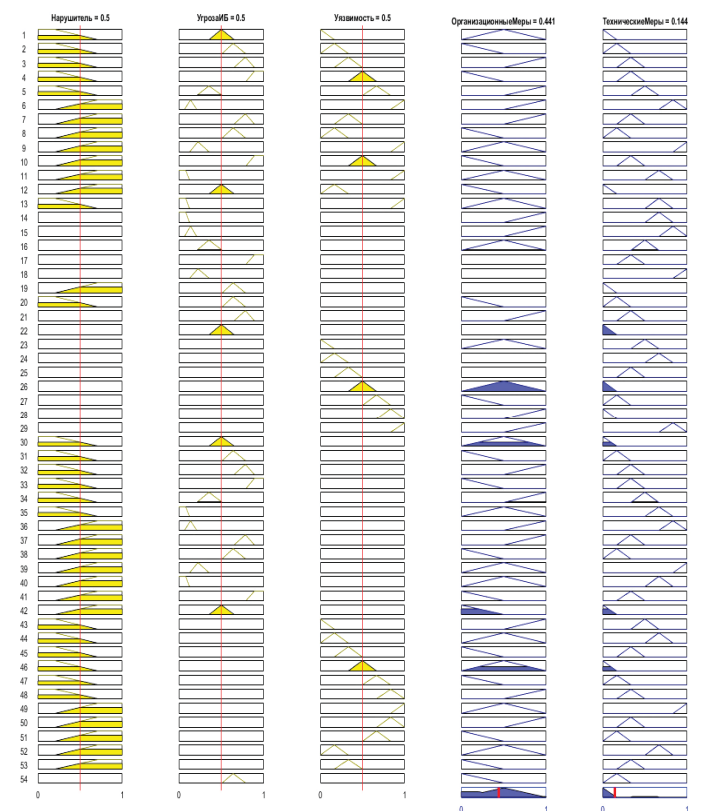


Рис. 9. Графическое представление правила нечеткого вывода

### 4. Агрегирование подусловий в нечетких правилах продукций.

Определение степени истинности условий для каждого правила системы нечеткого вывода и определение уровня отсечения для левой части каждого из правил по формуле [17]:

$$\alpha_{fi} = \min_i (A_{ik} (X_k)),$$

где  $A_{ik}$  – степень истинности нечетких высказываний;

$X_k$  – элемент нечеткого множества.

5. *Активизация подзаключений в нечетких правилах продукций.*

Далее находятся усеченные функции принадлежности по формуле:

$$B_i^*(y) = \min_i(\alpha_i, B_i(y)),$$

где  $B_i^*$  – активизированная функция принадлежности;

$\alpha_i$  – степень истинности  $i$ -го подзаключения;

$B_i(y)$  – функция принадлежности терма.

6. *Аккумуляция заключений нечетких правил продукций.*

Объединение полученных усеченных функций максимальной композицией нечетких множеств:

$$MF(y) = \max_i(B_i^*(y)),$$

где  $MF(y)$  – функция принадлежности итогового нечеткого множества.

5. *Дефаззификация (преобразование нечетких множеств в конкретное значение выходных переменных на выходе)*

На данном этапе определяется четкое значение выходных переменных – значение организационных и технических мер по защите. Значение определяется с использованием центроидного метода – определение центра тяжести полученной

кривой для определения максимальной степени соответствия [18]:

$$R = \frac{\int_0^1 R * \mu_Z(R) dR}{\int_0^1 \mu_Z(R) dR},$$

где  $R$  – четкое значение выходной переменной;

$\mu_Z(R)$  – функция принадлежности выходной переменной.

Полученные при нечетком выводе плоскости (рис. 10) показывают взаимосвязь входных и выходных параметров модели.

Для принятия решения о мерах защиты информации целесообразно определить граничные значения выходных параметров, которые обозначат уровень необходимости в получении таких мер.

Пороги принятия решений могут варьироваться исходя из особенностей и требуемого уровня защищенности ИСПДн, а состав таких мер определяет субъект управления ИБ, например, оценив показатели управленческого решения [19] или проведя многокритериальный анализ [20].

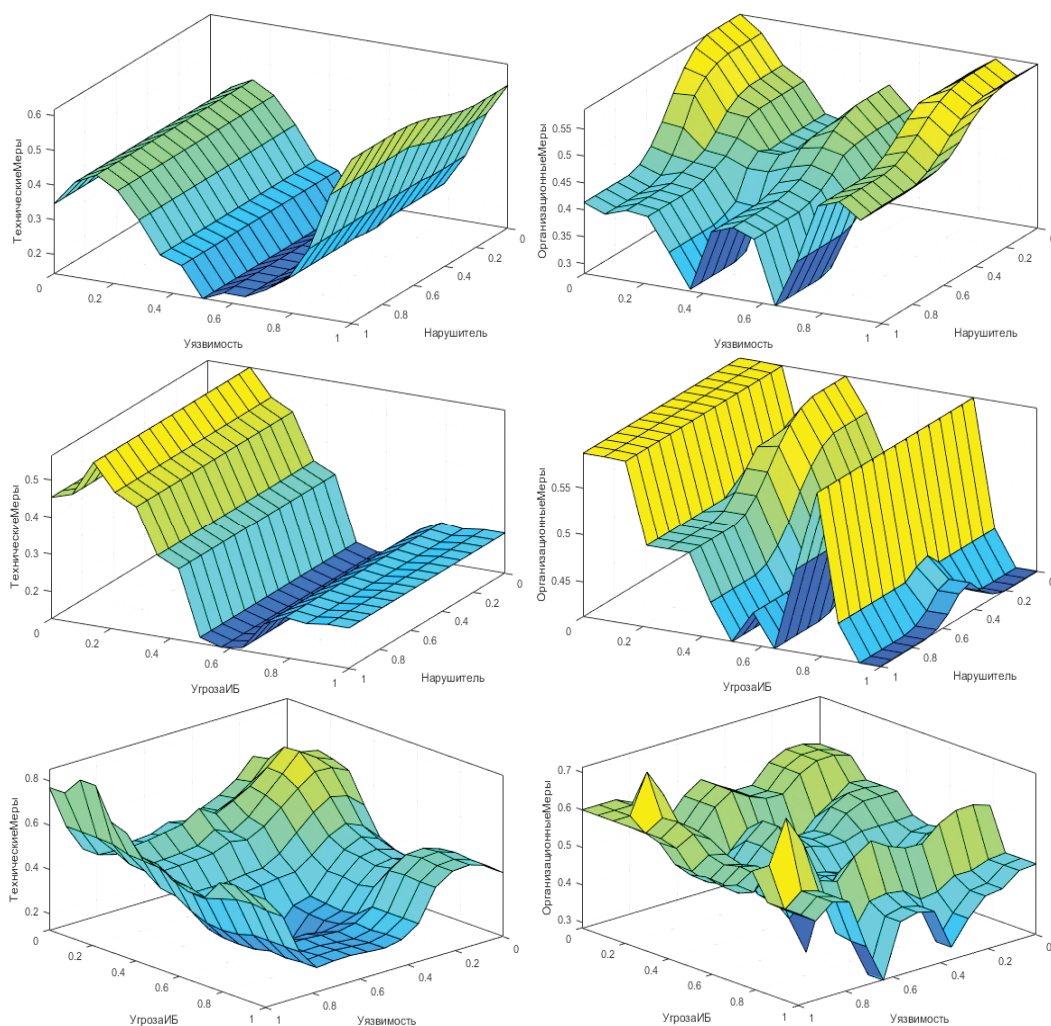


Рис. 10. Плоскости центроидных значений



В данной работе предложены три порога, в зависимости от которых может приниматься решение:

- если  $R \in [0, 0.37]$  – **зеленая зона**, то решение о реализации полученных мер нейтрализации угрозы допускается не принимать;
- если  $R \in [0.37, 0.64]$  – **желтая зона**, то решение о реализации полученных мер нейтрализации угрозы необходимо принять во внимание;
- если  $R \in [0.64, 1]$  – **красная зона**, то решение о реализации полученных мер нейтрализации угрозы необходимо выполнить.

Вектор входных переменных модели определяет конкретную точку на плоскости, положение которой определяет решение о выборе мер защиты информации исходя из заданных порогов.

### Влияние изменения входных переменных на комплекс защитных мер по обеспечению ИБ

Так как для конкретной ИСПДн вероятностные характеристики угроз, уязвимостей и нарушителей с их потенциальными возможностями как правило имеют индивидуальные особенности, то в данной статье проведено исследование реагирования предложенной модели на изменение входных характеристик.

Для идентификации влияния входных переменных на выходные значения построенной модели было принято допущение о равномерном распределении термов функций принадлежности входных параметров (рис. 12).

Сравнивая результаты моделирования плоскостей центроидных значений, указанных на рис. 13, где плоскость а) построена на основании распределения угроз согласно рис. 4, а плоскость б) – на основании распределения угроз согласно рис. 12, можно сделать следующие выводы.

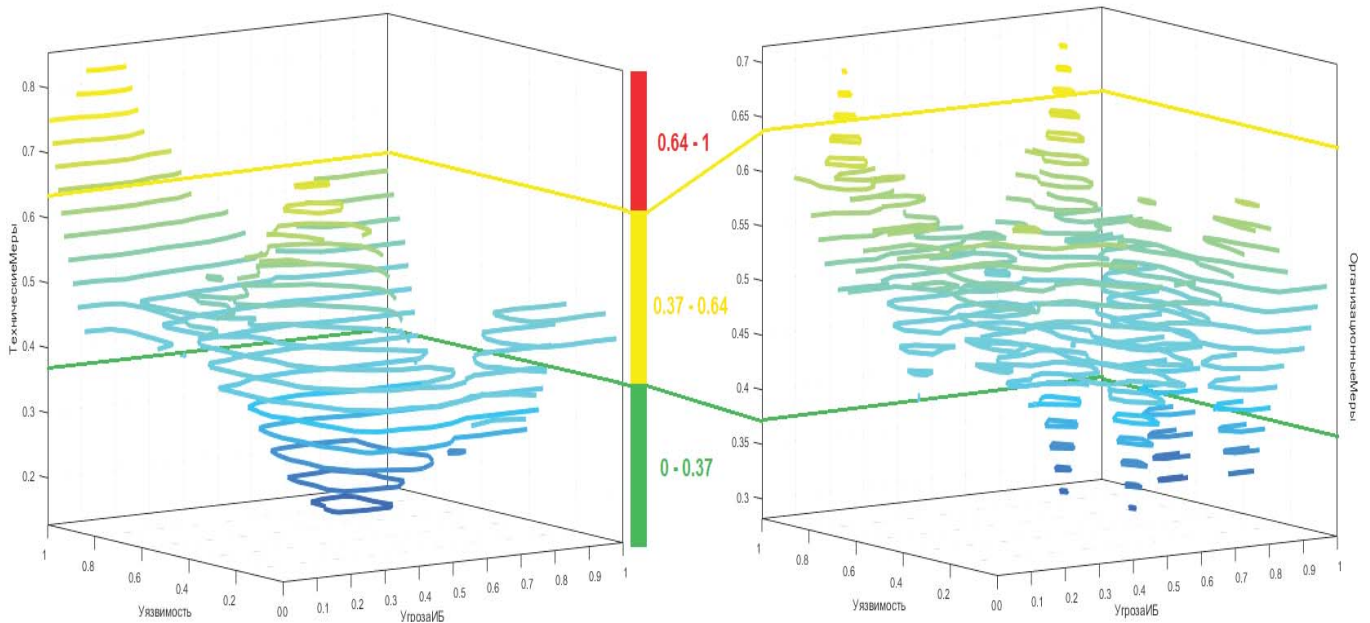


Рис. 11. Пороги принятия решений

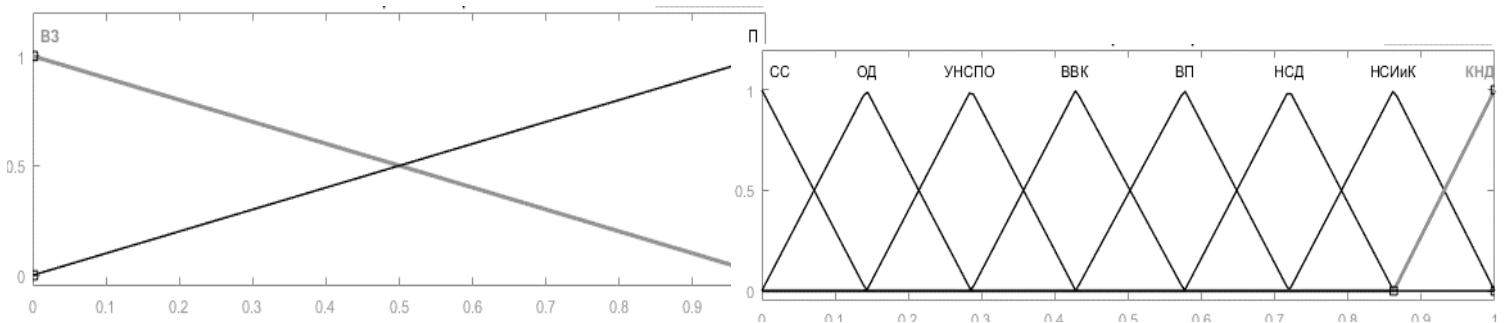


Рис. 12. Измененные функции принадлежности

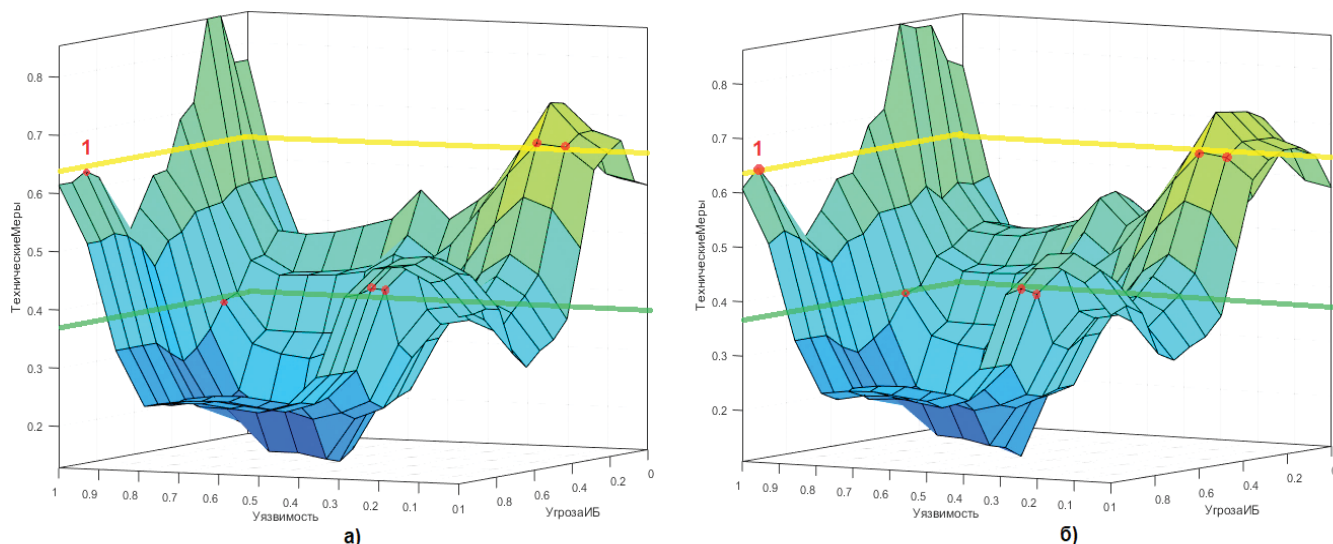


Рис. 13. Иллюстрации, поясняющие пороги принятия решений о мерах ЗИ, при различных входных переменных

Как видно из рисунка 13, указанные точки на плоскостях имеют разные уровни принятия решений при одних и тех же значениях входных переменных. Но поскольку указанные значения выходных параметров находятся на границе принятых порогов принятия решений, то решения о выборе необходимых мер защиты информации могут существенно отличаться. Рассмотрим точку 1 более подробно и определим значение параметра «угроза ИБ».

Исходя из рисунков 13 и 14 такое различие принимаемых решений относительно технических мер вероятно при сценарии, когда численное значение входного параметра «Угроза ИБ» имеет значения, представленные на рисунке 15. Численное значение входного параметра «Уязвимость» при этом равно 1.

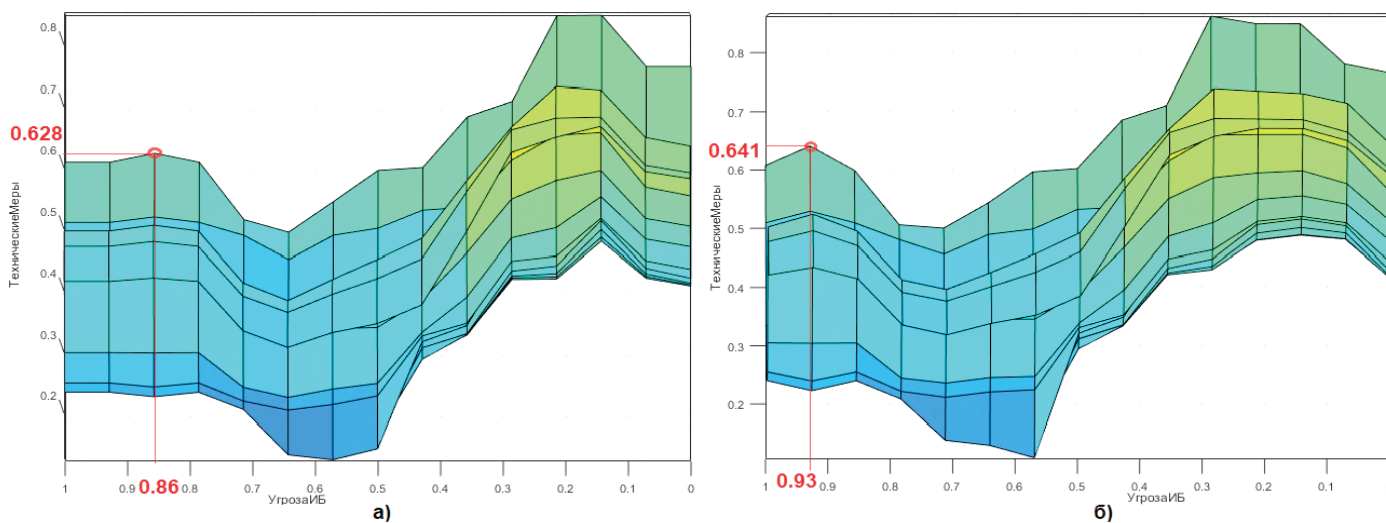


Рис. 14. Отображение значения переменной «Угроза ИБ»

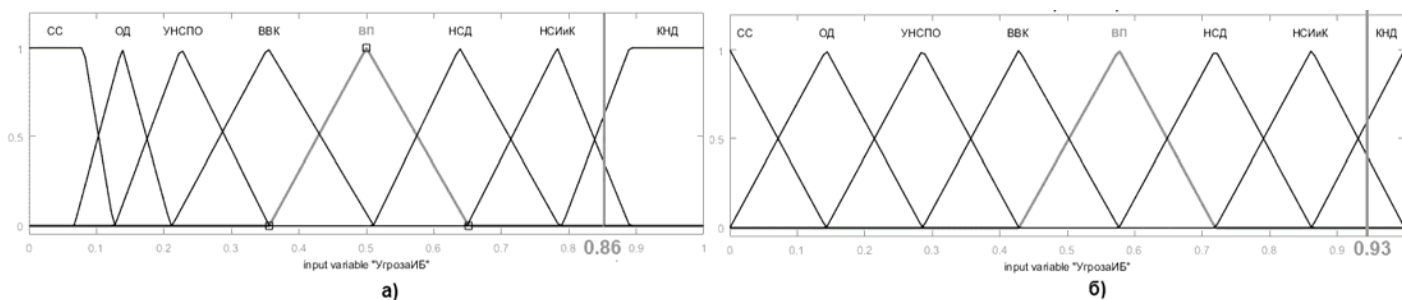


Рис. 15. Сравнение значений на функциях принадлежности

Описывая данный сценарий, численное значение входного параметра «угроза ИБ» принадлежит скорее интервалу термина «Кража носителей информации», чем термина «Несанкционированное изменение и копирование». Значению входного параметра «Уязвимость» принадлежит интервалу термина «Отсутствие контроля действий пользователей». Значение входного параметра «Нарушитель» принадлежит в равной степени и терму «Внешний злоумышленник» и терму «Внутренний нарушитель».

В случае расположении термов, указанных в варианте а), численное значение выходного параметра «Технические меры» находится в желтом пороге принятия решений, тогда как при расположении термов варианта б) уровень мер находится в интервале красного порога. Значение выходного параметра «Технические меры» при этом принадлежит интервалу термина «ОДТ». Численные значения выходного параметра «Организационные меры» – 0.489 и 0.549, что принадлежит интервалу термина «АНЗ». Данные значения находятся в одном пороге принятия решений – желтом.

Таким образом, приведенный пример изменения функций принадлежности входных переменных указывает на необходимость адекватного описания входных переменных с одной стороны, и реагирования выходных переменных модели на входные переменные с целью принятия эффективных мер для защиты информации, с другой.

## Выводы

Разработанная на основе данного алгоритма модель с использованием нечеткого вывода идентифицирует влияние угроз информационной безопасности на принятие решений о выборе мер по защите персональных данных в компьютерной системе, и на основании полученных плоскостей позволяет определить управленческое решение о выборе мер в зависимости от значений выбранных параметров.

## Литература

1. Астахова Л. В., Цимбол В. И. Применение самообучающейся системы корреляции событий информационной безопасности на основе нечеткой логики при автоматизации систем менеджмента информационной безопасности // Вестник южно-уральского государственного университета. Серия: компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2016. №1. С. 165-169. doi: 10.14529/ctcr160116.
2. Маркова Е. С., Пучков А. Ю., Петрунина А. А. Интеллектуальные системы управления инцидентами информационной безопасности // Материалы VI Международной молодежной научной конференции «Молодежь и XXI век – 2016» (Курск, 25–26 февраля 2016 года). Курск, 2016. С. 95-98.
3. Братченко А.И., Бутусов И.В., Кобелян А.М., Романов А.А. Применение методов теории нечетких множеств к оценке рисков нарушения критически важных свойств защищаемых ресурсов автоматизированных систем управления // Вопросы кибербезопасности. 2019. № 1 (29). С. 18-24. doi:10.21681/2311-3456-2019-1-18-24.
4. Larionova E.V. Neural networks and fuzzy logic in control systems. Condition, prospects, works // Материалы V Всероссийской научно-практической конференции на английском языке «Professional English in Use» (Хабаровск, 03 декабря 2019 года). Хабаровск, 2019. С. 157-160.
5. Сахно В.В., Маршаков Д.В., Айдинян А.Р. Применение методов нечеткой логики для решения задачи обеспечения информа-

ционной безопасности // Молодой исследователь Дона. 2018. № 4 (13). С. 28-35.

6. Anikin I.V. Information security risks assessment and management framework // Материалы IV международной конференции и молодежной школы "Информационные технологии и нанотехнологии" (Самара, 24–27 апреля 2018 года). Самара, 2018. С. 2231-2236.
7. Дмитриева А.В. Описание модуля системы поддержки принятия решений по проведению аудита информационной системы персональных данных // Материалы XIX региональной научно-практической конференции «Молодежь XXI века: шаг в будущее» (Благовещенск, 23 мая 2018 года). Благовещенск, 2018. С. 179-180.
8. Железняк В.П., Ряполов К.Я., Вялых С.А., Чапурин Е.Ю. Определение актуальных угроз безопасности персональных данных в информационных системах персональных данных // Материалы всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы деятельности подразделений УИС» (Воронеж, 25 октября 2018 года). Воронеж, 2018. С. 88-91.
9. Кунчулия В.В., Конопацкая Е.А. Вопросы комплексной системы защиты информации // Материалы I Международной научно-практической конференции «Вопросы математики, физики, химии, биологии в свете современных исследований» (Нижний Новгород, 31 мая 2016 года). Нижний Новгород, 2016. С. 28-35.
10. Спиридонов Г.И. Исследование каналов утечки информации и несанкционированного доступа // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2020. № 2. С. 146-152. doi:10.25586/RNU.V9187.20.02.P.146.
11. Зубарев И.В., Жидков И.В., Кадушкин И.В., Медовицкова С.А. // Уязвимости информационных систем Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2016. № 3. С. 174-184.
12. Лысенко А.Ф. Нечеткая логика в моделях экспертных систем // Вопросы науки и образования. 2018. № 16 (28). С. 7-9.
13. Хрипков Д.В. Формирование функций принадлежности в системах диагностики на базе нечеткого логического вывода // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. 2017. № 4. С. 110-116. doi: 10.24160/1993-6982-2017-4-110-116.
14. Gribin M. A. Evaluation of the correctness of selecting the rules of fuzzy logic and function of accessories in automatic control systems // Материалы XLI Международной научно-практической конференции «International scientific review of the problems and prospects of modern science and education» (Boston, USA, 29–30 января 2018 года). Boston, 2018. С. 64-67.
15. Bolshakov A., Rogatneva E. Evaluation of effectiveness of reduction information risk using fuzzy algorithm // Conference of Open Innovations Association, FRUCT. 2019. № 24. С. 584-588.
16. Савченко Д.В., Резникова К.М., Смышляева А.А. Нечеткая логика и нечеткие информационные технологии // Отходы и ресурсы. 2021. Т. 8. № 1. С. 10.
17. Шалдаев О.О., Лукичева С.В. Перспективы применения нечеткой логики // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2017. Т. 2. № 13. С. 311-313.
18. Juganson A., Zakoldaev D. Approach to assessment of firmware security under fuzzy input data // Материалы международной научной конференции «Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering – APITECH-2019» (Krasnoyarsk, 25-27 сентября 2019 года). Красноярск, 2019. С. 33040. doi:10.1088/1742-6596/1399/3/033040.
19. Балаишов О.В., Букачев Д.С. Подход к оценке качества управленческих решений на основе нечёткой логики // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. 2020. Т. 5. № 1 (15). С. 3-7.
20. Болышаков А.С., Раковский Д.И. Эффективный метод многокритериального анализа в области информационной безопасности // Правовая информатика. 2020. № 4. С. 55-66. doi: 10.21681/1994-1404-2020-4-55-66.

## FUZZY LOGIC DATA PROTECTION MANAGEMENT

**ALEXANDER S. BOLSHAKOV,**  
Moscow, Russia, as.bolshakov57@mail.ru

**ANASTASIA I. ZHILA,**  
Moscow, Russia, ai.zhila@yandex.ru

**ANDREY V. OSIN,**  
Moscow, Russia, osin\_a\_v@mail.ru

**KEYWORDS:** *personal data protection, personal data information system, information security management, fuzzy logic, fuzzy inference model.*

### ABSTRACT

**Introduction:** to ensure the necessary level of personal data security in computer systems, it is advisable to create an information security management system that would allow you to help choose protective measures for certain input data. **Purpose:** to develop an algorithm for the personal data protection model that allows considering a set of input factors for making decisions on information security. **Methods:** it is proposed to use the fuzzy inference apparatus as a mathematical apparatus for describing such a situation. The main advantage of using this mathematical approach in modeling a control system is the description of conditions and methods for solving problems under uncertainty. **Results:** when building an information security management system, defined a set of rules and study the influence of changes in input variables on a set of protective measures. The model developed on the basis of this algorithm using fuzzy inference identifies the impact of information security threats on decision-making

on the choice of measures to protect personal data in a computer system. The result of threat modeling is also planning that illustrate the relationship between the input and output parameters of the model. These planes allow you to determine the management decision on the choice of measures depending on the values of the selected parameters. The paper proposes three thresholds for the values of each of the protective measures, which determine the need for the measures used to neutralize the simulated threats. The influence of input variables on the output values of the constructed model identify a change in the distribution of the terms of the membership functions of the input parameters, the change of which can significantly affect the final decision on information security management. Discussion: the results of the work indicate the need for an adequate description of both the input variables and the response of the output variables of the model to the input variables in order to take effective measures to protect information.

### REFERENCES

1. Astakhova L. V., Tsimbol V. I. Application of a self-learning information security event correlation system based on fuzzy logic in the automation of information security management systems. *Vestnik yuzhno-ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika* [Bulletin of the South Ural State University. Series: computer technologies, control, radio electronics]. 2016. No. 1. P. 165-169. doi: 10.14529/ctcr160116. (In Rus)
2. Markova E. S., Puchkov A. Yu., Petrunina A. A. Intellektual'nye sistemy upravleniya incidentami informacionnoj bezopasnosti [Intelligent information security incident management systems]. *Materialy VI Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj konferencii "Molodezh' i XXI vek - 2016"* [Proceedings of the VI International Youth Scientific Conference "Youth and the XXI Century-2016"] (Kursk, February 25-26, 2016). Kursk, 2016. P. 95-98. (In Rus)
3. Bratchenko A. I., Butusov I. V., Kobelyan A.M., Romanov A. A. Application of methods of the theory of fuzzy sets to the assessment of

risks of violation of critical properties of protected resources of automated control systems. *Voprosy kiberbezopasnosti* [Cybersecurity issues]. 2019. No. 1 (29). P. 18-24. doi: 10.21681/2311-3456-2019-1-18-24.

4. Larionova E.V. Neural networks and fuzzy logic in control systems. Condition, prospects, works. *Materials of the V All-Russian scientific and practical conference in English "Professional English in Use"* (Khabarovsk, December 03, 2019). Khabarovsk, 2019. P. 157-160.

5. Sakhno V. V., Marshakov D. V., Aidinyan A. R. Application of fuzzy logic methods for solving the problem of ensuring information security. *Molodoj issledovatel' Dona* [Young explorer of the Don] 2018. No. 4 (13). P. 28-35. (In Rus)

6. Anikin I.V. Information security risks assessment and management framework. *Materials of the IV International Conference and Youth School "Information Technologies and Nanotechnologies"* (Samara, April 24-27, 2018). Samara, 2018. P. 2231-2236.

7. Dmitrieva A.V. Opisaniye modulya sistemy podderzhki prinyatiya reshenij po provedeniyu audita informacionnoj sistemy personal'nyh

dannyh [Description of the module of the decision support system for conducting an audit of the personal data information system]. *Materialy XIX regional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii "Molodezh' XXI veka: shag v budushchee"* [Materials of the XIX regional scientific and practical conference "Youth of the XXI century: a step into the future"] (Blagoveshchensk, May 23, 2018). Blagoveshchensk, 2018. P. 179-180. (In Rus)

8. Zheleznyak V. P., Ryapolov K. Ya., Vyalykh S. A., Chapurin E. Yu. Opredelenie aktual'nyh ugroz bezopasnosti personal'nyh dannyh v informacionnyh sistemah personal'nyh dannyh [Determination of actual threats to the security of personal data in the information systems of personal data]. *Materialy vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Aktual'nye problemy deyatel'nosti podrazdelenij UIS" (Voronezh, 25 oktyabrya 2018 goda)* [Materials of the All-Russian scientific and practical conference "Actual problems of the activity of the divisions of the Criminal Information System" (Voronezh, October 25, 2018)]. Voronezh, 2018. P. 88-91. (In Rus)

9. Kunchulia V. V., Konopatskaya E. A. Voprosy kompleksnoy sistemy zashchita informatsii [Questions of the complex system of information protection]. *Materialy I Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Voprosy matematiki, fiziki, himii, biologii v svete sovremennyh issledovanij"* (Nizhny Novgorod, 31 maya 2016 goda) [Materials of the I International Scientific and Practical Conference "Questions of Mathematics, Physics, Chemistry, Biology in the light of modern Research" (Nizhny Novgorod, May 31, 2016)]. Nizhny Novgorod, 2016. Pp. 28-35. (In Rus)

10. Spiridonov G. I. Research of channels of information leakage and unauthorized access. *Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Seriya: Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie* [Bulletin of the Russian New University. Series: Complex Systems: Models, Analysis and management]. 2020. No. 2. P. 146-152. doi: 10.25586/RNU.V9187.20.02. Pp. 146. (In Rus)

11. Zubarev I. V., Zhidkov I. V., Kadushkin I. V., Medovshchikova S. A. Uyazvimosti informacionnyh sistem Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii [Vulnerabilities of information systems Information and mathematical technologies in science and management]. 2016. No. 3. P. 174-184. (In Rus)

12. Lysenko A. F. Fuzzy logic in expert systems models. *Voprosy nauki i obrazovaniya* [Questions of science and education]. 2018. No.

16 (28). P. 7-9. (In Rus)

13. Khripkov D. V. Formation of membership functions in diagnostic systems based on fuzzy logical inference. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta. Vestnik MEI* [Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute. Bulletin of the MEI]. 2017. No. 4. P. 110-116. doi: 10.24160/1993-6982-2017-4-110-116. (In Rus)

14. Gribin M. A. Evaluation of the correctness of selecting the rules of fuzzy logic and function of accessories in automatic control systems. *Proceedings of the XLI International Scientific and Practical Conference "International scientific review of the problems and prospects of modern science and education"* (Boston, USA, January 29-30, 2018). Boston, 2018. Pp. 64-67.

15. Bolshakov A., Rogatneva E. Evaluation of effectiveness of reduction information risk using fuzzy algorithm. *Conference of Open Innovations Association, FRUCT*. 2019. No. 24. P. 584-588.

16. Savchenko D. V., Reznikova K. M., Smyshlyaeva A. A. Fuzzy logic and fuzzy information technologies. *Othody i resursy* [Waste and resources]. 2021. Vol. 8. No. 1. P. 10. (In Rus)

17. Shaldaev O. O., Lukicheva S. V. Prospects for the application of fuzzy logic. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики* [Actual problems of aviation and cosmonautics]. 2017. Vol. 2. No. 13. P. 311-313. (In Rus)

18. Iuganson A., Zakoldaev D. Approach to assessment of firmware security under fuzzy input data. *Proceedings of the international scientific conference "Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering-APITECH-2019"* (Krasnoyarsk, September 25-27, 2019). Krasnoyarsk, 2019. P. 33040. doi:10.1088/1742-6596/1399/3/033040.

19. Balashov O. V., Bukachev D. S. Approach to assessing the quality of management decisions based on fuzzy logic. *Mezhdunarodnyj zhurnal informacionnyh tekhnologij i energoeffektivnosti* [International Journal of Information Technology and Energy Efficiency]. 2020. Vol. 5. No. 1 (15). P. 3-7. (In Rus)

20. Bolshakov A. S., Rakovsky D. I. Effective method of multicriteria analysis in the field of information security. *Pravovaya informatika [Legal Informatics]*. 2020. No. 4. P. 55-66. doi: 10.21681/1994-1404-2020-4-55-66 doi:10.15862/10ECOR121. (In Rus)

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS:

**Bolshakov A.S.**, Associate Professor, Lecturer of the Moscow Technical University of Communications and Informatics.

**Zhila A. I.**, Master of the Moscow Technical University of Communications and Informatics.

**Osin A.V.**, Associate Professor, Lecturer of the Moscow Technical University of Communications and Informatics.

**For citation:** Bolshakov A. S., Zhila A. I., Osin A. V. Fuzzy logic data protection management. *H&ES Reserch*. 2021. Vol. 13. No. No. 4. P. 37-47. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-4-37-47 (In Russian)



# ВСЕРОССИЙСКАЯ МЕЖВЕДОМСТВЕННАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

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

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

*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

**КРУГЛЫЙ СТОЛ**

Цифровая психология: Использование математических методов при прогнозировании развития личности человека

НИУ МИЭТ  
Москва, Зеленоград

20 октября

*По итогам конференции отобранные оргкомитетом доклады в виде статей будут опубликованы в журналах из Перечня ВАК, РИНЦ  
T-comm • Информация и космос • H&ES Research • I-methods • Техника средств связи*

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





doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-4-49-55

# АНАЛИЗ БОЛЬШИХ ДАННЫХ НАДЕЖНОСТИ НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ МНОГОКАНАЛЬНЫХ СИСТЕМ

**БОЧКОВ**

**Александр Петрович<sup>1</sup>**

**ПРОУРЗИН**

**Владимир Афанасьевич<sup>2</sup>**

**ПРОУРЗИН**

**Олег Владимирович<sup>3</sup>**

## АННОТАЦИЯ

**Введение:** рассмотрены методы анализа больших данных надежности многоканальных систем с нагруженным резервом и невосстанавливаемыми элементами. Большие данные содержат информацию о наработках до отказа элементов, полученную при мониторинге эксплуатации аналогичных систем. Основная проблема, возникающая при анализе этих данных, связана с их разнообразием и достоверностью. Данные о надежности элементов системы соответствуют различным условиям эксплуатации и различным законам распределения отказов. Аппроксимация распределений отказов экспоненциальными законами существенно упрощает анализ надежности. Однако она может привести к значительным ошибкам и требует отдельного обоснования. **Цель исследования:** разработка подходов к анализу неоднородных больших данных надежности элементов систем, характеризующихся различными распределениями отказов. Вывод оценок точности аппроксимации распределения отказов экспоненциальными законами и критериев возможности такой аппроксимации. **Результаты:** изложены методы вычисления средней наработки до отказа систем с монотонной структурой. Получена оценка ошибки экспоненциальной аппроксимации распределений отказов элементов многоканальной системы. Показана связь ошибки экспоненциальной аппроксимации с коэффициентом вариации неэкспоненциального распределения отказов. Подробно исследован случай двухканальных систем. Для равномерного, логнормального, гамма-распределений и распределения Вейбулла построены зависимости средней наработки до отказа от коэффициента вариации. Построены области изменения коэффициента вариации этих распределений, при которых экспоненциальные аппроксимации оправданы. Приведен алгоритм построения средней наработки до отказа при анализе больших данных надежности невосстанавливаемой системы. **Практическая значимость:** анализ данных надежности, полученных при эксплуатации аналогичных систем, позволяет исключить дорогостоящие испытания на надежность. Показана связь выборочного коэффициента вариации с ошибкой экспоненциальной аппроксимации распределений отказов. Эта связь положена в основу критерия возможности такой аппроксимации.

## Сведения об авторах:

<sup>1</sup>д.т.н., проф., профессор Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Россия, kostpea@mail.ru

<sup>2</sup>к.ф.-м.н., с.н.с. института Проблем машиноведения Российской Академии Наук, г. Санкт-Петербург, Россия, proursin@gmail.com

<sup>3</sup>к.т.н., доцент Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Россия, pvo777@yandex.ru

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *большие данные, многоканальная система, нагруженный резерв, неэкспоненциальное распределение, коэффициент вариации, средняя наработка до отказа.*

**Для цитирования:** Бочков А.П., Проурзин В.А., Проурзин О.В. Анализ больших данных надежности невосстанавливаемых многоканальных систем // Научное издание «Информатика, компьютерное инженерное и контрольное обеспечение космических исследований Земли». 2021. Т. 13. № 4. С. 49-55. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-4-49-55

## Введение

Расчет характеристик надежности многоканальных систем является весьма актуальной темой в связи с необходимостью повышения качества проектирования систем с нагруженным резервом для критических технологий и инфраструктур. Важным вопросом остается оценка характеристик надежности таких систем в целом: средней наработки до отказа, средней наработки на отказ и коэффициента готовности.

Математическим моделям надежности, массового обслуживания многоканальных и кластерных систем посвящено большое количество научных публикаций (см., например, [1-19]). Однако, в указанных выше исследованиях в основном использовались предположения об экспоненциальном распределении времени ремонта и времени безотказной работы узлов системы, что существенно упрощало используемые математические модели. При этом не в полной мере отражалось разнообразие реальных распределений этих случайных величин. Таким образом, актуальной задачей является оценка показателей надежности систем с неэкспоненциальными распределениями времени безотказной работы каждого канала [13-16].

В работах [17,18] выведены сложные системы интегральных уравнений, описывающих показатели надежности многоканальных систем при произвольных законах распределения. Эти уравнения позволяют получить решения в аналитическом виде только для экспоненциальных законов распределения времени отказа и восстановления каналов. При неэкспоненциальных законах решение этих систем уравнений является весьма сложной проблемой. Возникает задача вывода условий, при которых различные распределения отказов и восстановлений можно аппроксимировать экспоненциальными законами.

Традиционно, для получения данных о надежности технических систем проводят весьма дорогостоящие испытания, требующие к тому же больших затрат времени. С другой стороны, мониторинг эксплуатации уже существующих объектов и их аналогов позволяет собрать огромную базу данных показателей надежности, в частности, данных по наработкам до отказа. Подходы и методы работы с такими базами составляют содержание направления исследований – анализ больших данных [20-23]. Понятие «большие данные» возникло на рубеже нового тысячелетия в среде специалистов по информационным технологиям как ответ на стремительное возрастание объема и сложности обрабатываемой информации. Можно дать следующее определение *Большие данные* (англ. *Big Data*) – методы обработки структурированных и неструктурированных данных огромных объемов и значительного многообразия в условиях непрерывного прироста и распределения по многочисленным узлам вычислительной сети. Основная проблема анализа эксплуатационных данных надежности систем состоит, во-первых, в том, что их эксплуатация характеризуется различными нагрузками и различными законами распределений отказов и восстановлений элементов, и, во-вторых, в наличие недостоверных и аномальных данных.

Цель настоящей работы заключается в разработке методов оценки надежности невосстанавливаемых многоканальных систем с нагруженным резервом при различных законах распределения отказов элементов. Поставлена задача исследования влияния неэкспоненциальности распределений от-

казов каналов на точность расчета средней наработки до отказа многоканальных и кластерных систем.

## 1. Постановка задачи и методика исследования

Рассматривается модель системы с нагруженным резервом из  $n$  невосстанавливаемых элементов (каналов). Отказы каждого канала системы считаются независимыми. В результате анализа данных эксплуатации аналогичных элементов получены выборки наработок до отказа каждого элемента системы. Пусть для  $j$ -го элемента задана выборка наработок до отказа  $t_{ji}$ ,  $j=1, \dots, n$ ;  $i=1, \dots, N_j$ . Законы распределений отказов, а также данные об эксплуатационных нагрузках неизвестны. Ставится задача оценки средней наработки системы до отказа  $T_C$ .

Далее используется допущение, что условия эксплуатации рассматриваемых изделий регламентированы и в целом их можно считать одинаковыми. Данные, связанные с нестандартными условиями эксплуатации, при пониженных и повышенных нагрузках и прочие аномальные данные следует отбросить в ходе процедуры отбраковки. Возникает задача предварительной обработки больших данных в условиях «дрейфа» параметров их моделей распределений, а именно: обнаружение аномальных значений (выбросов) и их удаление для обеспечения устойчивости результатов обработки [24,25]. В результате значения, полученные при повышенных или пониженных нагрузках будут удалены из рассмотрения.

На первом этапе решается задача оценивания средней наработки до отказа  $T_j$ ,  $j=1, \dots, n$ , каждого элемента системы. В условиях наличия недостоверных данных и «дрейфа» законов распределений, генерирующих данные, оценка параметра положения выборки (среднего значения), произведенная с помощью среднего арифметического, является неустойчивой. Для решения этой проблемы используют процедуры отбраковки аномальных данных и методы робастного оценивания параметра положения выборки. Эти методы входят в набор статистических методов анализа больших данных.

Простейший классический алгоритм отбраковки подозрительного на выброс значения элемента выборки называется *правилом 3-х сигм*. Сравнительно новые подходы к решению задачи отбраковки аномальных данных [25] основаны на алгоритмах разведочного анализа данных Тьюки, а именно *боксплота Тьюки* и его модификаций. В статистическом анализе больших данных обеспечению устойчивости оценки параметра положения используются робастные методы оценки, например, *метод Хьюбера*. *Двух-этапная процедура* робастного оценивания состоит в следующем. На первом этапе производится отбраковка выбросов с помощью боксплота Тьюки. На втором этапе производится оценивание параметра положения путем вычисления выборочного среднего для оставшихся элементов выборки.

Пусть в результате робастного оценивания получены значения средней наработки до отказа  $T_j$ ,  $j=1, \dots, n$ , каждого элемента системы. Этого достаточно, чтобы аппроксимировать закон распределения наработки  $j$ -го элемента экспоненциальным законом  $\hat{F}_j(t) = 1 - e^{-\lambda_j t}$ ,  $\lambda_j = 1/T_j$ . Полученные законы распределения можно использовать для расчета средней наработки системы до отказа  $T_C$ . Однако, при распределениях, отличных от экспоненциального, такая ап-

проксимация приведет к погрешности оценки показателей надежности системы. Насколько велика эта погрешность? При каких условиях экспоненциальная аппроксимация допустима и когда следует от нее отказаться? Ниже эти вопросы исследованы подробнее. Ставится задача оценки погрешности экспоненциальной аппроксимации при различных законах распределения. Обозначим через  $T_E$  среднюю наработку системы до отказа при экспоненциальной аппроксимации законов распределения наработки элементов. Ошибка  $\delta$  этой аппроксимации задается величиной относительного отклонения  $T_C$  от  $T_E$ :  $\delta = T_C/T_E - 1$ . Оценим эту ошибку.

Отказ системы есть случайное событие, описываемое бинарной (булевой) переменной  $X$ , которая принимает одно из двух значений – 0 (отказ) или 1 (работа). Это событие зависит от  $n$  простых независимых событий, описываемых бинарными переменными  $x_j$  (работа или отказ  $j$ -го элемента). Вводится структурная функция работоспособности системы [19], задающая зависимость состояния системы  $X$  от состояний ее элементов:  $X = \varphi(x_1, \dots, x_n)$ . Например, для схемы  $n$  последовательно соединенных элементов структурная функция есть произведение всех бинарных переменных:  $\varphi(x_1, \dots, x_n) = x_1 x_2 \dots x_n$ . Для схемы  $n$  параллельно соединенных элементов структурная функция есть  $\varphi(x_1, \dots, x_n) = 1 - (1-x_1)(1-x_2)\dots(1-x_n)$ . Рассматриваются системы, структурные функции которых обладают свойством монотонности<sup>1</sup>. Это, например, системы с последовательной, параллельной, последовательно-параллельной структурами, мостиковые схемы и многие другие.

Пусть  $F_j(t)$  – функция распределения наработки до отказа  $j$ -го элемента,  $P_j(t) = 1 - F_j(t)$  – функция вероятности безотказной работы  $j$ -го элемента. Средняя наработка  $j$ -го элемента до отказа  $T_j = \int_0^{\infty} P_j(t) dt$ . Обозначим  $F_C(t)$  – функция рас-

пределения наработки до отказа системы,  $P_C(t) = 1 - F_C(t)$  – функция вероятности безотказной работы системы. Известен (Байхельт Ф. и Франкен П, 1988) следующий важный результат для монотонных систем. Функция вероятности безотказной работы  $P_C(t)$  монотонной системы до отказа определяется структурной функцией работоспособности и функциями вероятности безотказной работы элементов системы:  $P_C(t) = \varphi(P_1(t), P_2(t), \dots, P_n(t))$ . Тогда, средняя наработка системы до отказа

$$T_C = \int_0^{\infty} P_C(t) dt = \int_0^{\infty} \varphi(P_1(t), P_2(t), \dots, P_n(t)) dt.$$

Выражение ошибки экспоненциальной аппроксимации для системы с произвольной монотонной структурой принимает следующий вид

$$\delta = \frac{\int_0^{\infty} \varphi(P_1(t), P_2(t), \dots, P_n(t)) dt}{\int_0^{\infty} \varphi(e^{-\lambda_1 t}, e^{-\lambda_2 t}, \dots, e^{-\lambda_n t}) dt} - 1, \text{ где } \lambda_j = 1/T_j.$$

## 2. Система с параллельным соединением одинаковых элементов

Остановимся подробнее на случае многоканальной системы с нагруженным резервом из  $n$  параллельно соединен-

<sup>1</sup> Байхельт Ф. и Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход. М.: Радио и связь, 1988.

ных одинаковых элементов. Например, это может быть компьютерный кластер. Пусть функции распределения наработки до отказа каждого канала одинаковы  $F_j(t) = F_0(t)$ ,  $P_j(t) = P_0(t) = 1 - F_0(t)$ . Тогда  $\varphi(P_1(t), \dots, P_n(t)) = 1 - F_0^n(t)$ ,

$$T_C = \int_0^{\infty} (1 - F_0^n(t)) dt = \int_0^{\infty} P_0(t) (1 + F_0(t) + \dots + F_0^{n-1}(t)) dt. \quad (1)$$

Поскольку  $0 \leq F_0(t) \leq 1$ , то из (1) следует оценка

$$T_0 \leq T_C \leq nT_0, \quad (2)$$

где  $T_0 = \int_0^{\infty} P_0(t) dt$  – средняя наработка элемента до отказа.

Пусть наработки элементов распределены по экспоненциальному закону:  $F_0(t) = 1 - e^{-\lambda_0 t}$ ,  $P_0(t) = e^{-\lambda_0 t}$ ,  $\lambda_0 = 1/T_0$ . Подстановка экспоненциального закона в выражение (1), интегрирование и преобразования приводят к известному равенству для параллельных систем:

$$T_E = T_0 H_n, \quad (3)$$

где  $H_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k}$  – частичная сумма гармонического ряда:  $H_2=3/2$ ,  $H_3=11/6$ ,  $H_4=25/12$  и т.д. Из (2),(3) получим следующую оценку ошибки аппроксимации:

$$H_n^{-1} - 1 \leq \delta \leq nH_n^{-1} - 1. \quad (4)$$

Заметим, что эта оценка универсальна и не привязана к конкретному распределению отказов. Нижняя граница этой оценки достигается, когда значения наработки элементов стремятся к одному и тому же детерминированному значению, т.е. дисперсия  $D$  распределения случайной величины стремится к нулю. Верхняя граница достигается, когда разброс случайных значений наработки элементов увеличивается, т.е. при стремлении дисперсии к бесконечности. В теории надежности более информативным показателем разброса является коэффициент вариации  $V = \sigma/T_0$  – отношение стандартного отклонения  $\sigma = \sqrt{D}$  к среднему значению. Используя введенные обозначения, можно записать, что

$V = \sqrt{\frac{2}{T_0^2} \int_0^{\infty} t P_0(t) dt} - 1$ . Коэффициент вариации различных рас-

пределений может изменяться от нуля до бесконечности. Коэффициент вариации экспоненциального распределения всегда равен единице и не зависит от параметра  $\lambda_0$ .

Получен следующий результат. При изменении коэффициента вариации  $V$  реального распределения отказов элементов от нуля до бесконечности ошибка (4) аппроксимации  $\delta(V)$  монотонно изменяется от  $H_n^{-1} - 1$  до  $nH_n^{-1} - 1$ , проходя через нулевое значение. Величина коэффициента вариации может служить критерием допустимости экспоненциальной аппроксимации.

Ниже приводится пример построения зависимости  $\delta(V)$  в двухканальной системе ( $n = 2$ ) с нагруженным резервом для равномерного, логнормального, гамма распределений и распределения Вейбулла. Для вычислений использованы методы статистического моделирования [26,27] в программной среде статистических вычислений R.

*Равномерное распределение.* Рассматривается равномерное распределение наработки элемента, заданное на интер-

вале  $[T_0 - d, T_0 + d]$ , где параметр  $d$  изменяется от 0 до  $T_0$ . При этом коэффициент вариации равен  $V = d / (\sqrt{3}T_0)$  и изменяется от 0 до  $1/\sqrt{3}$ . Для фиксированного значения  $T_0$  задается последовательность значений параметра  $d$ , вычисляется  $T_C$  методом статистического моделирования, вычисляется  $V = V(d)$  и строится график зависимости отношения  $T_C/T_E$  от  $V$ .

Логнормальное распределение имеет плотность распределения  $f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma t}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)^2\right)$ , математическое ожидание  $T_0 = \exp(\mu + \sigma^2/2)$ , дисперсию  $D = (\exp(\sigma^2) - 1)\exp(2\mu + \sigma^2)$  и коэффициент вариации  $V = \sqrt{\exp(\sigma^2) - 1}$ . Для фиксированного значения  $T_0$  задается последовательность значений параметра  $\sigma$ , по которому вычисляется параметр  $\mu = \ln T_0 - \sigma^2/2$ , коэффициент вариации и величина  $T_C$  методом статистического моделирования. Строится график зависимости отношения  $T_C/T_E$  от  $V$ .

Распределение Вейбулла задается функцией  $F_0(t) = 1 - \exp(-(t/\lambda)^k)$ , математическое ожидание

$T_0 = \lambda\Gamma(1+1/k)$ , дисперсия, коэффициент вариации  $V = \sqrt{\frac{\Gamma(1+2/k)}{\Gamma^2(1+1/k)} - 1}$ . Здесь  $\Gamma(x)$  – гамма-функция. Для фиксированного значения  $T_0$  задается последовательность значений параметра  $k$ , по которому вычисляется параметр  $\lambda = T_0 / \Gamma(1+1/k)$ , коэффициент вариации и величина  $T_C$  методом статистического моделирования. Строится график зависимости отношения  $T_C/T_E$  от  $V$ .

Гамма-распределение задается функцией  $F_0(t) = \chi(\beta, \alpha) / \Gamma(\beta)$ , где  $\chi(\beta, \alpha)$  – нижняя неполная гамма-функция. Математическое ожидание  $T_0 = \beta/\alpha$ , дисперсия  $D = \beta/\alpha^2$ , коэффициент вариации  $V = \beta^{-0.5}$ . Для фиксированного значения  $T_0$  задается последовательность значений параметра  $\beta$ , по которому вычисляется параметр  $\alpha$ , коэффициент вариации и величина  $T_C$  методом статистического моделирования. Строится график зависимости отношения  $T_C/T_E$  от  $V$ . Результаты расчетов приведены на Рис. Они точно укладываются в формулу (4). Для случая  $n=2$  она принимает вид:  $-1/3 \leq \delta(V) \leq 1/3$ .

При равномерном распределении коэффициент вариации лежит в пределах от 0 до  $1/\sqrt{3}$ . При этом средняя наработка до отказа системы  $T_C$  изменяется от  $T_0$  до  $1.33T_0$ . Величина относительного отклонения  $\delta(V)$  изменяется от -0.33 до -0.11. При распределении Вейбулла коэффициент вариации лежит в пределах от 0 до бесконечности. Средняя наработка до отказа системы  $T_C$  изменяется от  $T_0$  до  $2T_0$ . Величина относительного отклонения  $\delta(V)$  изменяется от -0.33 до 0.33. При логнормальном распределении коэффициент вариации лежит в пределах от 0 до бесконечности. Средняя наработка до отказа системы лежит в пределах от  $T_0$  до  $2T_0$ . Величина относительного отклонения  $\delta(V)$  изменяется от -0.33 до 0.33.

При равномерном распределении коэффициент вариации лежит в пределах от 0 до  $1/\sqrt{3}$ . При этом средняя наработка до отказа системы  $T_C$  изменяется от  $T_0$  до  $1.33T_0$ . Величина относительного отклонения  $\delta(V)$  изменяется от -0.33 до -0.11.

При распределении Вейбулла коэффициент вариации лежит в пределах от 0 до бесконечности. Средняя наработка до отказа системы  $T_C$  изменяется от  $T_0$  до  $2T_0$ . Величина относительного отклонения  $\delta(V)$  изменяется от -0.33 до 0.33.

При логнормальном распределении коэффициент вариации лежит в пределах от 0 до бесконечности. Средняя наработка до отказа системы лежит в пределах от  $T_0$  до  $2T_0$ . Величина относительного отклонения  $\delta(V)$  изменяется от -0.33 до 0.33.

При гамма-распределении результаты практически совпадают с распределением Вейбулла. Величина относительного отклонения  $\delta(V)$  изменяется от -0.33 до 0.33.

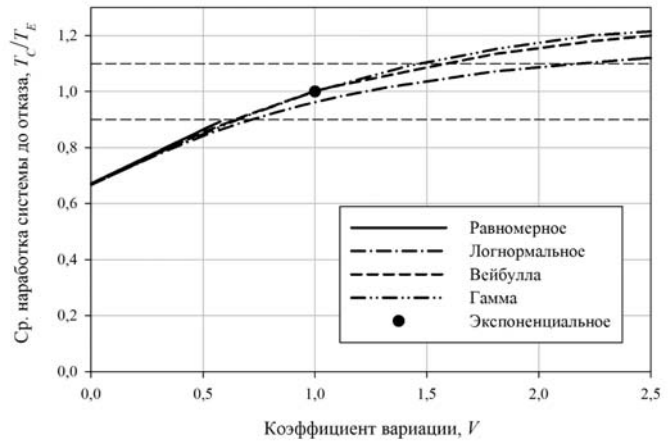


Рис. 1. Зависимость средней наработки до отказа двухканальной системы без восстановления от коэффициента вариации при различных распределениях. Горизонтальные пунктирные линии выделяют зону 10% отклонения от  $T_E$

Зададимся величиной допустимой ошибки  $\delta_0$  вычисления средней наработки до отказа  $T_C$ . Используя результаты расчета, приведенные на рисунке 1, неравенство  $|\delta(V)| \leq \delta_0$  может быть переписано в виде  $V_1 \leq V \leq V_2$ .

Пусть, например,  $\delta_0 = 0.1$ . Тогда аппроксимация равномерного распределения экспоненциальным невозможна при всех значениях коэффициента вариации  $V$ , поскольку для равномерного распределения при всех  $V$  выполнено  $|\delta(V)| > 0.1$ . Аппроксимация распределения Вейбулла возможна при  $0.65 \leq V \leq 1.6$ . Аппроксимация гамма-распределения возможна при  $0.65 \leq V \leq 1.5$ . Аппроксимация логнормального распределения возможна при  $0.71 \leq V \leq 2.2$ .

В диапазоне  $0 \leq V \leq 1$  все четыре распределения – равномерное, логнормальное, Вейбулла и гамма-распределения дают практически одно и то же значение  $T_C$  при одинаковом значении коэффициента вариации. В диапазоне  $0 \leq V \leq 2$  разница в значении  $T_C$  при одинаковом значении коэффициента вариации для рассмотренных распределений не превышает 10%.

Учет реального распределения отказов элементов двухканальной системы может дать выигрыш в точности вычисления от 0 до 33% по сравнению с экспоненциальной аппроксимацией.

Ниже приведен алгоритм построения средней наработки до отказа при анализе больших данных надежности невозстановливаемой многоканальной системы с нагруженным резервом из одинаковых элементов.

1. Исследование зависимости средней наработки до отказа системы от коэффициента вариации при различных распределениях и определение допустимого диапазона коэффициента вариации  $[V_1, V_2]$  для экспоненциальной аппроксимации. Исследование проводится аналогично приведенному выше исследованию двухканальной системы. При  $n=2$  и  $\delta_0=0.1$  этот диапазон имеет вид  $[0.7, 1.6]$ .

2. Извлечение из различных источников данных по наработкам элементов системы и их аналогов, составление начальной выборки  $\{t_i\}$ .

3. Получение робастных оценок параметра положения и коэффициента вариации для полученной выборки по двух-этапной процедуре робастного оценивания. На первом этапе производится отбраковка выбросов с помощью метода 3-х сигм или боксплота Тьюки. На втором этапе для каждого элемента производится вычисление выборочного среднего

$$\hat{T}_0 = \frac{1}{N} \sum_1^N \hat{t}_i \quad \text{и} \quad \text{выборочного коэффициента вариации}$$

$\hat{V} = \frac{1}{\hat{T}_0} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N (t_i - \hat{T}_0)^2}$  по оставшимся после отбраковки выборкам.

4. Если коэффициент вариации  $\hat{V}$  лежит в допустимом диапазоне  $[V_1, V_2]$ , то используется экспоненциальная аппроксимация и полагается  $T_C = T_0 H_n$ . В противном случае строится двухпараметрическое распределение (например, распределение Вейбулла), соответствующее найденным значениям среднего  $\hat{T}_0$  и коэффициента вариации  $\hat{V}$ . Средняя наработка системы до отказа  $T_C$  вычисляется по формуле (1).

## Выводы

При анализе больших данных надежности многоканальных систем аппроксимация реальных законов распределения экспоненциальными законами может привести к значительной ошибке и требует отдельного обоснования. В качестве инструмента такого обоснования можно использовать анализ выборочного коэффициента вариации. Здесь получены условия на значение коэффициента вариации распределения, при выполнении которых этот закон распределения можно аппроксимировать экспоненциальным. Такая замена существенно упрощает расчет всех основных характеристик надежности многоканальной системы.

Выведено выражение для ошибки аппроксимации реальных распределений отказов экспоненциальными. Показано, что учет реальных распределений отказов может давать существенный выигрыш в точности при расчете характеристик надежности многоканальной системы.

## Литература

1. Козинев И.А., Гришин А.В. Метод оценки надёжности интегрированных радиоэлектронных систем управления космическими аппаратами на стадии эксплуатации // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2020. Т. 12. № 3. С. 13–19. doi: 10.36724/2409-5419-2020-12-3-13-19
2. Хабаров Р.С., Хомоненко А.Д. Расчет многоканальной системы массового обслуживания с прерываниями и гиперэкспоненциальными распределениями времен обработки заявок и периода непрерывной занятости // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 5 С. 48–9. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10287
3. Peschansky A. I. Stationary characteristics of an unreliable multi-server queueing system with losses and time redundancy // Automation and Remote Control. 2019. Vol. 80. No. 4. Pp. 648–665.
4. Богатырев В. А., Богатырев С. В. Надежность мультикластерных систем с перераспределением потоков запросов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2017. Т. 60. №. 2. С.171-176. doi:10.17586/0021-3454-2017-60-2-171-177
5. Захаров Д.Н., Никулин В.С. Анализ методов статистической оценки эксплуатационной надежности вычислительных комплексов // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2020. Т. 12. № 1. С. 64–69. doi:10.36724/2409-5419-2020-12-1-64-69

6. Шебе Х., Шубинский И.Б. Предельная надежность структурного резервирования // Надежность. 2016. Т.16. №1. С. 3-13. doi:10.21683/1729-2646-2016-16-1-3-13
7. Тюрин С.Ф. Обеспечение надежности технических средств путем их троирования и расщепления // Надежность. 2019. Т.19. №1. С.4-9. doi:10.21683/1729-2646-2019-19-1-4-9
8. Маковеев О.Л., Костюнин С.Ю. Оценка параметров безопасности и безотказности систем контроля и управления // Надежность. 2017. Т.17. №1. С.46-52. doi:10.21683/1729-2646-2017-17-1-46-52
9. Долгополов Б.А., Зайко Ю.Г., Михайлов В.А. Метод определения показателя долговечности микросхем // Надежность. 2019. Т.19. №3. С.3-6. doi:10.21683/1729-2646-2019-19-3-3-6
10. Зайко Ю.Г., Искандарова Л.Н., Трахтомиров А.В. Имитационная модель для расчета показателей надежности резервированных радиоэлектронных систем // Надежность. 2016. Т.16. №3. С.8-17. doi:10.21683/1729-2646-2016-16-3-8-17
11. Геча В.Я., Барбул Р.Н., Сидяев Н.И., Бутенко Ю.И. Методология оценки надежности космических аппаратов при проектной и конструкторской проработке // Надежность. 2019. Т.19. №2. С.3-8. doi:10.21683/1729-2646-2019-19-2-3-8
12. Gurov S.V., Utkin L.V. Reliability of repairable reserved systems with failure aftereffect // Automation and Remote Control. 2017. Vol. 78. No. 1. Pp. 113-124. doi:10.1134/S000511791701009X
13. Li X. Y., Hu J., Huang H. Z., Li Y. F. Non-exponential Distributions in Reliability Modeling of PMS: Approximation and Simulation Approaches // In Modeling and Simulation Based Analysis in Reliability Engineering. CRC Press. 2018. Pp. 47-80.
14. Peyghami S., Fotuhi-Firuzabad M., Blaabjerg F. Reliability Evaluation in Microgrids With Non-Exponential Failure Rates of Power Units // IEEE Systems Journal. 2020. Vol. 14. No. 2. Pp. 2861-2872. doi: 10.1109/JSYST.2019.2947663.
15. Trivedi K. S., Bobbio A. Reliability and availability engineering: modeling, analysis, and applications. Cambridge: Cambridge University Press. 2017. 712p.
16. Zhou H., Li X., Huang H. Approximate method for reliability assessment of complex phased mission systems // Journal of Shanghai Jiaotong University (Science). 2017. Vol. 22. No. 2. Pp. 247-251. doi: 10.1007/s12204-017-1828-2
17. Хомоненко А.Д., Благовоицкая Е.А., Проурзин О.В., Андрюк А.А. Прогноз надежности кластерной вычислительной системы с помощью полумарковской модели альтернирующих процессов и мониторинга // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 4. С. 72–82. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10099
18. Harlamov B.P., Prouzrin O.V. On an Interval of Faultless Work for a System of Two Independent Alternating Renewal Processes // Journal of Mathematical Science. 2017. Vol. 225. No. 5. Pp.818-832. doi:https://doi.org/10.1007/s10958-017-3498-x
19. Prouzrin V. A. The Dynamic Reliability Model under Variable Loads and Accelerated Tests // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2020. Vol. 49, No. 5, Pp. 395–400. doi: 10.3103/S10526188200501
20. Leskovec J., Rajaraman A., Ullman J. D. Mining of massive data sets. Cambridge: Cambridge university press, 2020. 498c. doi: 10.1017/9781108684163
21. Wang S.L., Hou Y.T. Big data analysis for distributed computing job scheduling and reliability evaluation // Microelectronics Reliability. 2019. Vol. 94, Pp. 41-45, doi:10.1016/j.microrel.2019.01.010.
22. Nachiappan R., Javadi B., Calheiros R. N., Matawie K. M. Cloud storage reliability for big data applications: A state of the art survey // Journal of Network and Computer Applications. 2017. Vol. 97. Pp. 35-47. doi: 10.1016/j.jnca.2017.08.011
23. Hong Y., Zhang M., Meeker W. Q. Big data and reliability applications: The complexity dimension, Journal of Quality Technology. 2018. Vol.50. No.2. Pp.135-149. doi:10.1080/00224065.2018.1438007
24. Jureckova J., Picek J., Schindler M. Robust statistical methods with R. CRC Press. 2019..268p.
25. Shevlyakov G.L., Shagal A., Shin V.I. A comparative study of robust and stable estimates of multivariate location // Journal of Mathematical Sciences. 2019. Vol. 237. No. 6. Pp. 831-845. doi: 10.1007/s10958-019-04210
26. Pan Q., Dias D. An efficient reliability method combining adaptive support vector machine and Monte Carlo simulation // Structural Safety. 2017. Vol. 67. Pp. 85-95. doi:10.1016/j.strusafe.2017.04.006
27. Chen X.G. A novel reliability estimation method of complex network based on Monte Carlo // Cluster Computing. 2017. Vol. 20. No 2. Pp. 1063-1073. doi:10.1007/s10586-017-0826-3

## BIG DATA ANALYSIS OF RELIABILITY OF NON-RESTORABLE MULTICHANNEL SYSTEMS

**ALEXANDER P. BOCHKOV**

Saint-Petersburg, Russia, kostpea@mail.ru

**VLADIMIR A. PROURZIN**

Saint-Petersburg, Russia, proursin@gmail.ru

**OLEG V. PROURZIN**

Saint-Petersburg, Russia, pvo777@yandex.ru

**KEYWORDS:** *electronic equipment; technical diagnostics; diagnostic models; formalized conceptualization; semantic templates.*

### ABSTRACT

**Introduction:** methods for analyzing big data of reliability of multichannel systems with a loaded reserve with non-recoverable elements are considered. Big data contains information on the operating time to failure of elements, obtained by monitoring the operation of similar systems. The main problem that arises when analyzing big data is related to its variety and veracity. Reliability data of system elements correspond to different operating conditions and different laws of failure distribution. The exponential approximation of failure distributions greatly simplifies reliability analysis. However, it can lead to significant errors and requires a separate justification. **Purpose:** development of approaches to the analysis of heterogeneous big data of reliability of system elements characterized by different distributions of failures. Derivation of estimates of the accuracy of approximation of the distribution of failures by exponential laws and criteria for the possibility of such an approximation. **Results:** methods for calculating the mean time to failure of systems with a monotonic structure are described. An estimate of the error

of exponential approximation of the distributions of failures of elements of a multichannel system is obtained. The relationship between the error of exponential approximation and the coefficient of variation of non-exponential distribution of failures is shown. The case of two-channel systems is investigated in detail. For uniform, lognormal, gamma and Weibull distributions, the dependences of the average operating time to rejection of the coefficient of variation are plotted. Areas of variation of the coefficient of variation of these distributions are constructed, for which exponential approximations are justified. An algorithm for constructing the mean time to failure in the analysis of large reliability data of a non-recoverable two-channel system is presented. **Practical relevance:** analysis of reliability data obtained from monitoring the operation of similar systems eliminates costly reliability tests. The relationship between the sample coefficient of variation and the error of exponential approximation of failure distributions in the analysis of big data of system reliability is shown. This connection forms the basis of the criterion for the possibility of such an approximation.

### REFERENCES

1. Kozinov I.A., Grishin A. V. Method of reliability assessment of integrated radio-electronic systems of spacecraft control at the stage of operation. *H&ES Research*. 2020. Vol. 12 No. 3. P. 13-19. doi: 10.36724/2409-5419-2020-12-3-13-19 (In Russian)
2. Khabarov R.S., Khomonenko A.D. Calculation of preemptive multi-server queueing systems with hyperexponential distributions of service times and busy period. *H&ES Research*. 2019. Vol. 11 No. 5. P. 48-56. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10287 (In Russian)
3. Peschansky A. I. Stationary characteristics of an unreliable multi-server queueing system with losses and time redundancy. *Automation and Remote Control*. 2019. Vol. 80. No. 4. P. 648-665.
4. Bogatyrev V. A., Bogatyrev S. V. Reliability of multi-cluster systems with redistribution of the flow of requests. *Journal of Instrument Engineering*. 2017. Vol. 60, N 2. P. 171-177. doi: 10.17586/0021-3454-2017-60-2-171-177 (in Russian)
5. Zakharov D.N., Nikulin V.S. Analysis of methods of statistical evaluation of operational reliability of computational complexes. *H&ES Research*. 2020. Vol. 12. No. 1. P. 64-69. doi:10.36724/2409-5419-2020-12-1-64-69 (In Russian)
6. Schabe H., Shubinsky I.B. Limit reliability of structural redundancy. *Dependability*. 2016. Vol.16. No.1. Pp.3-13. doi:10.21683/1729-2646-2016-16-1-3-13 (In Russian)
7. Tyurin S.F. Ensuring the dependability of technical facilities through triplication and quadrupling. *Dependability*. 2019. Vol.19. No.1. Pp.4-9. doi:10.21683/1729-2646-2019-19-1-4-9 (In Russian)
8. Makoveev O.L., Kostyunin S.Yu. Evaluation of safety and reliability parameters of supervision and control systems // *Dependability*. 2017. Vol.17. No.1. Pp.46-52. doi:10.21683/1729-2646-2017-17-1-46-52 (In Russian)
9. Dolgoplov B.A., Zayko Yu.G., Mikhaylov V.A. A method of identifying the durability indicator of microcircuitry. *Dependability*. 2019. Vol.19. No.3. Pp.3-6. doi:10.21683/1729-2646-2019-19-3-3-6 (In Russian)
10. Zayko Yu.G., Iskandarova L.N., Trakhtomirov A.V. Simulation model to calculate the indices of reliability of redundant radio electronic systems. *Dependability*. 2016. Vol.16. No.3. Pp.8-17. doi:10.21683/1729-2646-2016-16-3-8-17 (In Russian)
11. Gecha V.Y., Barbul R.N., Sidniaev N.I., Butenko Yu.I. Method of dependability assessment of spacecraft in design and engineering studies. *Dependability*. 2019. Vol.19. No.2. Pp.3-8. doi:10.21683/1729-2646-2019-19-2-3-8 (In Russian)



12. Gurov S.V., Utkin L.V. Reliability of repairable reserved systems with failure aftereffect. *Automation and Remote Control*. 2017. Vol. 78. No. 1. P. 113-124. doi:10.1134/S000511791701009X
13. Li X. Y., Hu J., Huang H. Z., Li Y. F. Non-exponential Distributions in Reliability Modeling of PMS: Approximation and Simulation Approaches. In *Modeling and Simulation Based Analysis in Reliability Engineering*. CRC Press. 2018. P. 47-80.
14. Peyghami S., Fotuhi-Firuzabad M., Blaabjerg F. Reliability Evaluation in Microgrids With Non-Exponential Failure Rates of Power Units. *IEEE Systems Journal*. 2020. Vol. 14. No. 2. P. 2861-2872. doi: 10.1109/JSYST.2019.2947663.
15. Trivedi K. S., Bobbio A. Reliability and availability engineering: modeling, analysis, and applications. Cambridge: Cambridge University Press. 2017. 712 p.
16. Zhou H., Li X., Huang H. Approximate method for reliability assessment of complex phased mission systems. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*. 2017. Vol. 22. No. 2. P. 247-251. doi: 10.1007/s12204-017-1828-2
17. Khomonenko A.D., Blagoveshchenskaya E.A., Prourzin O.B., Andruk A.A. Prediction of reliability of cluster computing system using semi-markov model of alternating processes and monitoring. *H&ES Research*. 2018. Vol. 10. No. 4. P. 72-82. doi: 10.24411/2409-5419-2018- 10099 (In Russian)
18. Harlamov B.P., Prourzin O.V. On an Interval of Faultless Work for a System of Two Independent Alternating Renewal Processes. *Journal of Mathematical Science*. 2017. Vol. 225. No. 5. Pp.818-832. doi:https://doi.org/10.1007/s10958-017-3498-x
19. Prourzin V. A. The Dynamic Reliability Model under Variable Loads and Accelerated Tests. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2020, Vol. 49, No. 5, Pp. 395-400. doi: 10.3103/S10526188200501
20. Leskovec J., Rajaraman A., Ullman J. D. Mining of massive data sets. Cambridge: Cambridge university press, 2020. 498 p. doi: 10.1017/9781108684163
21. Wang S.L., Hou Y.T. Big data analysis for distributed computing job scheduling and reliability evaluation. *Microelectronics Reliability*. 2019. Vol. 94, P. 41-45, doi:10.1016/j.microrel.2019.01.010.
22. Nachiappan R., Javadi B., Calheiros R. N., Matawie K. M. Cloud storage reliability for big data applications: A state of the art survey. *Journal of Network and Computer Applications*. 2017. Vol. 97. P. 35-47. doi: 10.1016/j.jnca.2017.08.011
23. Hong Y., Zhang M., Meeker W. Q. Big data and reliability applications: The complexity dimension, *Journal of Quality Technology*. 2018. Vol.50. No.2, P.135-149. doi:10.1080/00224065.2018.1438007
24. Jureckova J., Picek J., Schindler M. Robust statistical methods with R. CRC Press. 2019. 268 p.
25. Shevlyakov G.L., Shagal A., Shin V.I. A comparative study of robust and stable estimates of multivariate location. *Journal of Mathematical Sciences*. 2019. Vol. 237. No. 6. P. 831-845. doi: 10.1007/s10958-019-04210
26. Pan Q., Dias D. An efficient reliability method combining adaptive support vector machine and Monte Carlo simulation. *Structural Safety*. 2017. Vol. 67. P. 85-95. doi:10.1016/j.strusafe.2017.04.006
27. Chen X.G. A novel reliability estimation method of complex network based on Monte Carlo. *Cluster Computing*. 2017. Vol. 20. No 2. P. 1063-1073. doi:10.1007/s10586-017-0826-3

**INFORMATION ABOUT AUTHORS:**

**Bochkov A. P.**, PhD, Full Professor, Professor at the Department of Emperor Alexander, St. Petersburg State transport university.  
**Prourzin V. A.**, PhD, Senior Research Officer of Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences.  
**Prourzin O.V.**, PhD, Associate Professor at the Department of Emperor Alexander, St. Petersburg State transport university.

---

**For citation:** Bochkov A. P., Prourzin V. A., Prourzin O.V. Big data analysis of reliability of non-restorable multichannel systems. *H&ES Research*. 2021. Vol. 13. No. 4. Pp. 49-55. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-4-49-55 (In Russian)

# ПРИМЕНЕНИЕ БЛОКЧЕЙН-ТЕХНОЛОГИИ В КРИТИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ: КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ

**ФАБИЯНОВСКИЙ**

**Игорь Николаевич<sup>1</sup>**

**НИКОЛАЕВ**

**Владимир Витальевич<sup>2</sup>**

**САЕНКО**

**Игорь Борисович<sup>3</sup>**

## АННОТАЦИЯ

**Введение:** наиболее перспективным подходом к созданию критических распределенных информационных систем является использование современных информационных технологий. В этой связи большой интерес вызывает исследование возможностей построения систем такого класса на основе блокчейн-технологии, которая, в отличие от традиционной транзакционной технологии, предполагает распределенное хранение данных с формированием распределенного реестра. **Цель исследования:** целью исследования является разработка концептуальных основ такого подхода, охватывающих особенности блокчейн-технологии. **Методы:** цель достигается путем проведения сравнительного анализа блокчейн-технологии и транзакционной технологии, разработки алгоритма функционирования системы, определения порядка взаимодействия органов управления и формирования критериев построения системы на основе блокчейн-технологии. **Результаты:** результаты сравнительного анализа показали, что внедрение блокчейн-технологии в критические распределенные информационные системы повышает оперативность сбора данных и доступность хранимых и передаваемых внутри системы информационных ресурсов. Разработанный алгоритм функционирования распределенной информационной системы на основе блокчейн-технологии содержит три этапа, в ходе которых за счет использования хэш-функций, преобразования содержания передаваемого документа в цифровой отпечаток и распространения цепочки блоков данных по всем узлам сети обеспечивается распределенное хранение данных и их полная безопасность. **Практическая значимость:** рассмотренный порядок взаимодействия органов управления и проведения обмена информационными ресурсами в системе на основе блокчейн-технологии продемонстрировал возможность практической реализации этой технологии в критической распределенной информационной системе и позволил сформировать критерии ее построения. **Обсуждение:** в качестве основных критериев предлагается использовать коэффициенты своевременности информационного обмена и доступности информационных ресурсов. Для удовлетворения этих критериев в ходе поиска оптимальных сочетаний параметров реализации блокчейн-технологии следует использовать имитационную модель функционирования критической распределенной информационной системы, основанной на блокчейн-технологии, что рассматривается как направление дальнейших исследований.

## Сведения об авторах:

<sup>1</sup>адъюнкт Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия, fabik-spb@yandex.ru

<sup>2</sup>адъюнкт Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия, fortune-rus@yandex.ru

<sup>3</sup>д.т.н., профессор, профессор кафедры Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия, ibsaen@mail.ru

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** информационная технология; информационный ресурс; распределенная информационная система; блокчейн; хэш-функция.

**Для цитирования:** Фабияновский И. Н., Николаев В. В., Саенко И. Б. Применение блокчейн-технологии в критических распределенных информационных системах: концептуальные основы // Научные исследования в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 4. С. 56-64. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-4-56-64



## Введение

В настоящее время наиболее перспективным подходом к созданию критических распределенных информационных систем (КРИС) является направление, основанное не на постоянной модернизации существующей системы, а на использовании современных информационных технологий. Исследования в этом направлении позволяют повысить без существенных затрат эффективность информационного взаимодействия органов управления в крупных организациях [1,2]. На сегодняшний день постоянное нарастание объема и разнообразия информации, циркулирующей в системе управления, требует также постоянного увеличения пропускной способности каналов. Тем самым возможно обеспечить требуемые гибкость и оперативность при реагировании на изменения обстановки, происходящие в режиме реального времени. В этой связи предлагается пересмотреть существующие взгляды на организацию и ведение информационного обмена между органами управления, участвующими в решении специальных задач.

Для обеспечения возможности проведения сравнительного анализа современных информационных технологий (ИТ) необходимо ввести ряд понятий и определить условия ведения информационного обмена между органами управления в КРИС [3–6]. Под КРИС будем понимать множество территориально-разнесенных объектов управления, включающих в себя системы хранения множества информационных ресурсов (ИР), которые подчинены управляющему объекту. Обмен ИР между управляющим объектом и объектами управления организован посредством информационно-телекоммуникационной сети (ИТКС). Ко множеству ИР относятся документы, циркулирующие в системе управления КРИС (приказы, распоряжения, донесения, сводки), нормативные документы (приказы, нормы, штаты), справочная информация (классификаторы, словари терминов), а также учетная информация (анкеты, картотеки), зафиксированные на соответствующих носителях.

В таких условиях сокращение времени на сбор от объектов управления данных, или ИР, описывающих изменения состояния объектов управления и состояния внешней окружающей среды в режиме реального времени, напрямую зависит от структуры системы управления, объема ИР и доступности ИР. Системы автоматизации, функционирующие по такому принципу, должны иметь доступ к большому объему оперативно обновляемой информации, а также быть способными своевременно ее обрабатывать и наглядно отображать результаты [7]. На сегодняшний день такая задача представляется чрезвычайно актуальной, хотя и достаточно сложной.

Следует отметить, что среди систем, автоматизирующих информационные процессы по обмену ИР, значительное место занимают транзакционные системы. В теории баз данных (БД) под транзакцией понимается последовательность операций, производимых над БД и переводящих БД из одного в другое согласованное состояние. Типичными примерами транзакционных систем являются учетно-отчетные либо информационно-справочные системы. Такие системы работают с небольшими по размеру совокупностями данных, но идущими большим потоком, причем главным критерием функционирования системы является минимум времени доведения обрабатываемых данных до управляющего объекта.

Другой особенностью транзакционных систем является то, что циркулирующая в них информация, как правило, идет по системе управления снизу вверх, формируя при этом управляющие воздействия. Это позволяет выбирать тот или иной способ обработки данных, причем последние все чаще имеют неструктурированную форму. Под термином «неструктурированные данные» в дальнейшем будем понимать информацию, которая либо не имеет заранее определенной структуры, либо она не организована в установленном порядке. Примерами неструктурированных данных могут служить текстовые сообщения, метаданные, аудио, видео, изображения и т.д. В то же время неструктурированные данные могут храниться в форме структурированных объектов, например, в форме электронных файлов или документов. Эти документы всегда имеют определенную структуру. Положим далее, что сочетание структурированных и неструктурированных данных также будет являться неструктурированными данными.

Анализ предметных областей, специализирующихся на использовании систем с массовыми транзакциями, например, систем электронного документооборота, управления технологическими процессами и т.д. [8], показал довольно низкую оперативность обработки неструктурированных данных. Связано это с необходимостью централизованного хранения ИР, различных по объему, различными интервалами времени на их передачу, а также с увеличением количества пользователей, доработкой и расширением функциональных возможностей системы и т.д. [9,10].

Целью настоящей статьи является рассмотрение концептуальных основ нового подхода к реализации процессов информационного обмена в КРИС, основанного на применении блокчейн-технологии. По результатам сравнительного анализа ИТ будут выявлены достоинства и недостатки этого подхода, рассмотрен алгоритм функционирования КРИС на основе блокчейн-технологии, представлен пример взаимодействия органов управления в рамках КРИС, а также обоснованы критерии построения КРИС, реализующих блокчейн-технологии.

## Сравнительный анализ ИТ, применяемых в транзакционных системах

Разнообразие современных ИТ, применяющихся для построения и функционирования распределенных информационных систем и охватывающих широкий спектр предметных областей, достаточно велико [9]. Принципы построения распределенных информационных систем во многом похожи, однако от выбора ИТ может сильно зависеть производительность всей системы [11–14].

Результаты сравнительного анализа двух основных ИТ, которые могут применяться и применяются для построения транзакционных распределенных информационных систем, приведены в таблице 1 [15,16].

Исходя из результатов проведенного сравнительного анализа, можно сделать вывод, что блокчейн-технология обладает более высокой оперативностью сбора ИР, отличается децентрализацией, а также имеет более высокую доступность хранящихся ИР. Достигается это за счет специальным образом проводимого дублирования полной копии реестра в каждой локальной БД.

Таблица 1

Сравнительный анализ применения различных ИТ в транзакционной системе

Отличительные признаки ИТ в транзакционной системе	Распределенная БД, основанная на реляционной модели данных	Система распределенного реестра на основе блокчейн-технологии
Размещение данных	Централизованно	Децентрализованно
Вид хранимых данных	Структурированные данные	Неструктурированные данные
Отображение результатов	Таблица	Любой электронный документ
Манипуляции над данными	Добавить, редактировать, удалить	Добавить
Проверка документа на подлинность	Отсутствует, данные можно изменять всем пользователям	Изменять документ разрешено только автору этого документа
Оперативность сбора ИР	Средняя	Высокая
Доступность ИР	Низкая	Высокая

### Алгоритм функционирования КРИС на основе блокчейн-технологии

Рассмотрим более детально общий алгоритм функционирования КРИС на основе блокчейн-технологии, представленный на рис. 1 [17–20].

В алгоритме выделяются три этапа.

Первый этап начинается с того, что пользователь сети создает на своем автоматизированном рабочем месте электронный документ. Документ состоит из содержания и метаданных о документе. С помощью хэш-функции от содержания вычисляется его хэш-значение, которое называется цифровым отпечатком (ЦО) содержания. Суть хэш-функции заключается в следующем. Хэш-функция  $h(\cdot)$  принимает в качестве аргумента сообщение (документ)  $M$  произвольной длины и возвращает хэш-значение  $h(M) = H$  фиксированной длины. Хешированная информация является сжатым двоичным представлением основного сообщения произвольной длины. При этом следует отметить, что зависимость значения хэш-функции от документа является достаточно сложной. Потому восстановить документ исходя из значения хэш-функции, как предполагается, является невозможным.

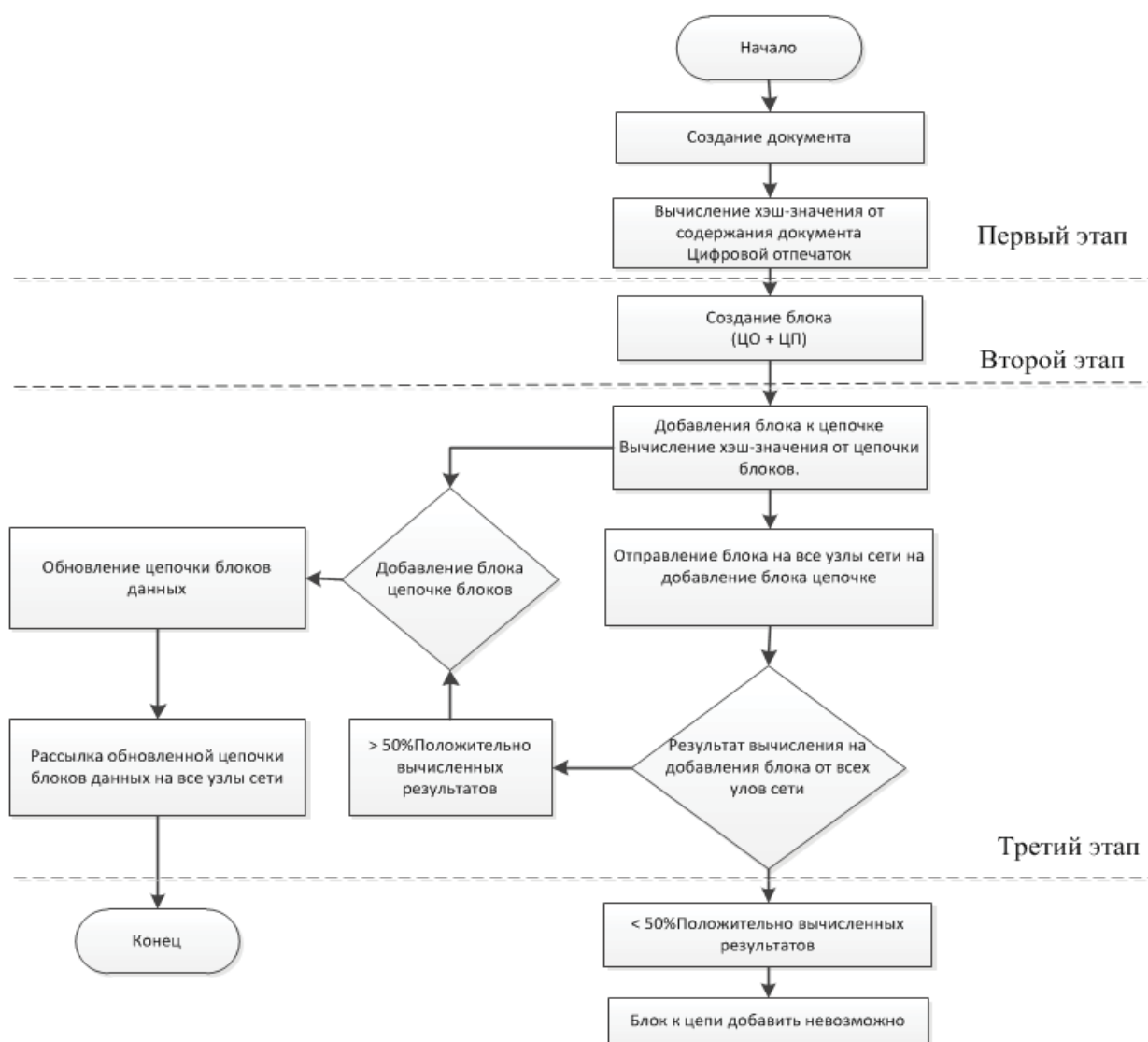


Рис. 1. Алгоритм функционирования КРИС на основе блокчейн-технологии

На втором этапе создается блок данных. Для создания блока данных используется хеш-значение от ЦО и секретный ключ пользователя. Метаданные документа при этом остаются в открытом виде. Секретный ключ необходим для идентификации пользователя в сети. Таким образом, содержание документа остается открытым и известным только автору. Сам документ считается подписанным цифровой подписью (ЦП). С помощью открытого ключа, который имеется у каждого пользователя сети, можно проверить идентичность содержания и авторство этого документа.

На третьем этапе созданный блок отправляется на все узлы в сети и добавляется к цепочке блоков. Для этой цели в каждом узле сети вычисляется хеш-значение от созданного блока и блока, являющегося последним в цепочке. Полученные значения отправляются на старший узел в сети, где принимается решение на добавление блока к цепочке. Если полученные значения составляют больше 50 процентов положительно вычисленных результатов, то тогда блок добавляется к цепочке. Затем обновленное хэш-значение от цепочки блоков рассылается на каждый узел сети. В противном случае считается, что документ изменен, и блок удаляется. Такие манипуляции над данными обеспечивают безопасность информации, которая хранится в ранее созданных блоках.

Результатом функционирования КРИС на основе блокчейн-технологии является распределенный реестр, в котором будет оперативно отображаться вся информация о вновь созданном документе, предназначенная для всех участников информационного обмена в сети. Описание этого документа обеспечивается с помощью метаданных, представленных в открытом виде, и ЦП документа, с помощью которой прове-

ряется идентичность и авторство документа. Ниже рассмотрим порядок информационного взаимодействия органов управления в РИС

### Порядок информационного взаимодействия органов управления в РИС

Рассмотрим информационное взаимодействие органов управления в РИС на примере, отражающем автоматизированную обработку и обмен документами в некоторой организации. Пусть руководитель организации имеет автоматизированную информационную систему (АИС), позволяющую отслеживать процесс текущей деятельности, начальник бухгалтерского (финансового) отдела – АИС бухгалтерского учета (финансового анализа), начальник кадрового отдела – АИС кадрового учета и т.д. Такая совокупность АИС, взаимодействующих между собой с помощью ИТКС, представляет собой пример типовой распределенной информационной системы. Решение руководителя о трудоустройстве в организацию нового сотрудника должно изменить состояние БД во всей системе. Для этого необходимо в каждой АИС вести учет всех изменений своих БД, согласовывать их с другими АИС и предоставлять их по запросу. На рис. 2 показан процесс создания единого ЦО. ЦО отображает содержание данных в транзакции, свернутое до определенного объема посредством специального алгоритма, с помощью которого, при необходимости, проверяется идентичность этого содержания.

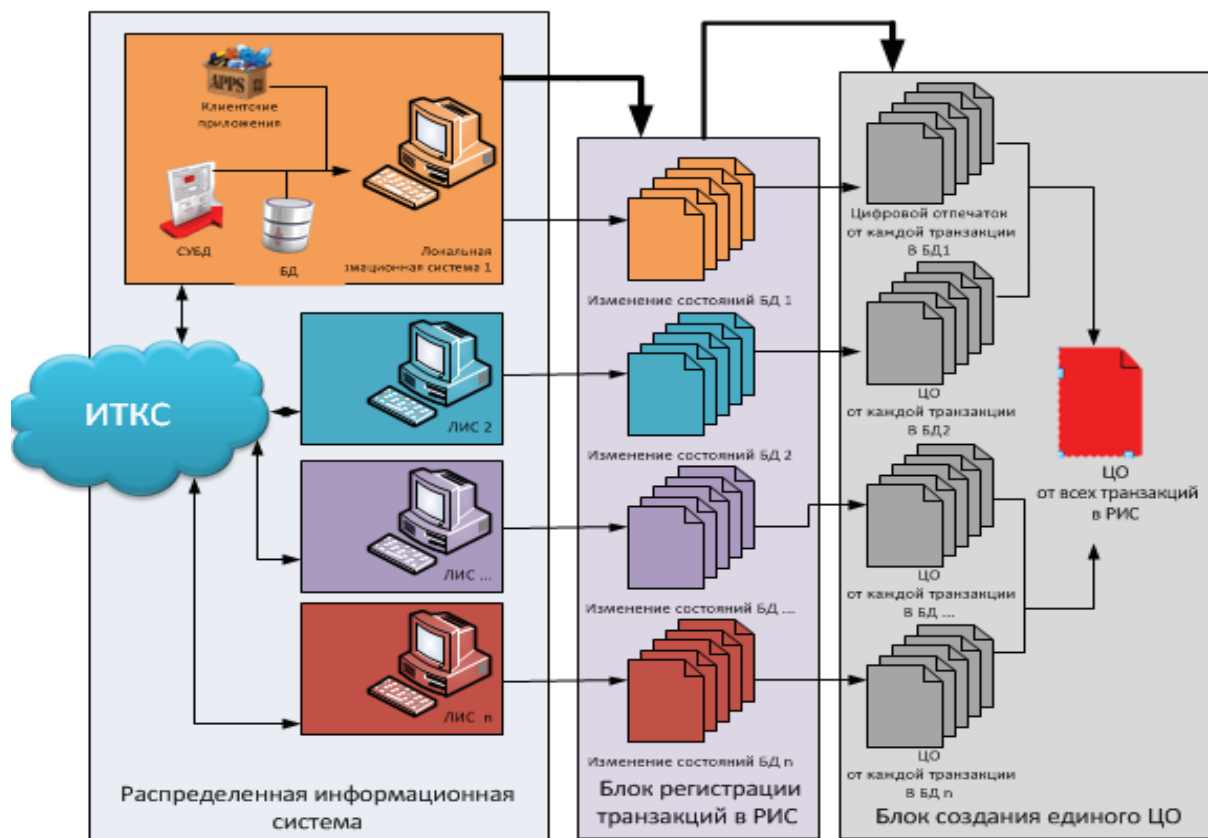


Рис. 2. Процесс создания единого ЦО

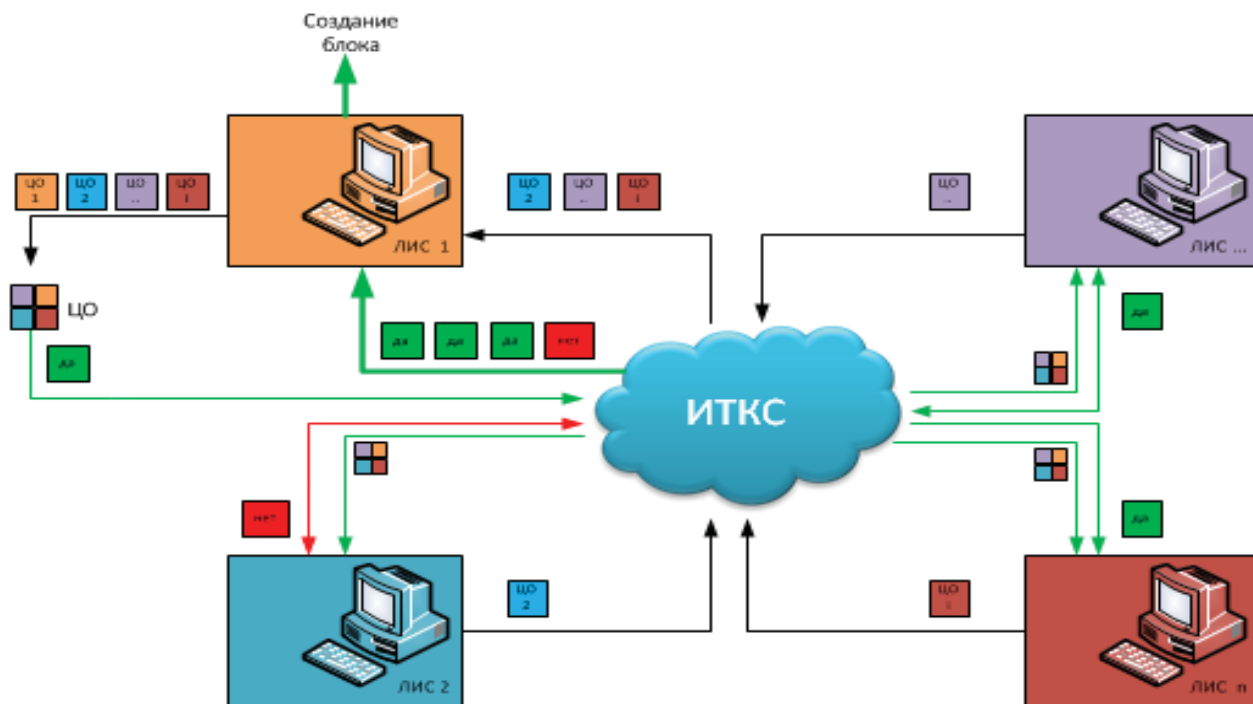


Рис. 3. Процесс согласования данных

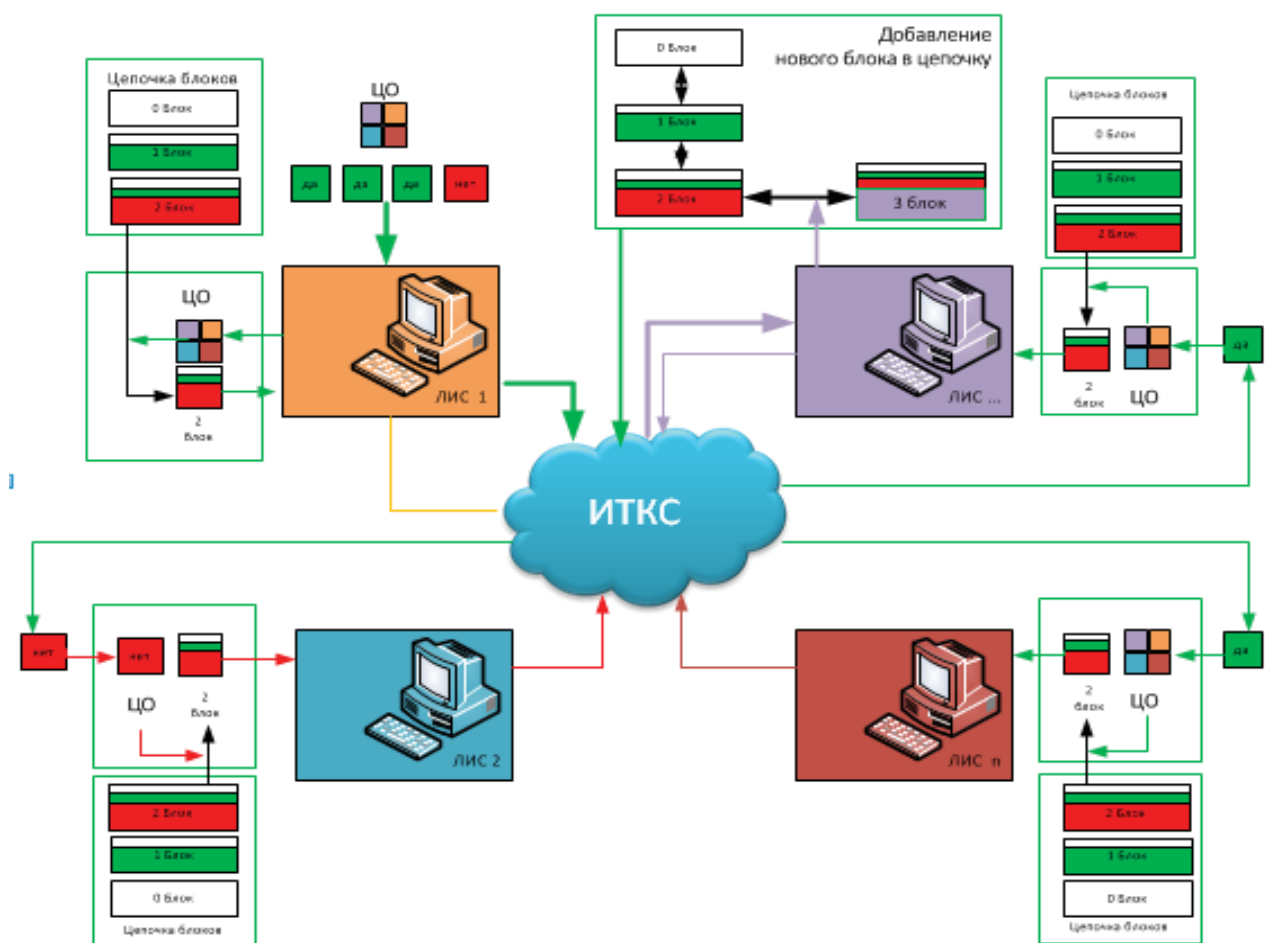


Рис. 4. Добавление нового блока в цепочку

Положим, что локальная информационная система 1 (ЛИС1), в которой работает руководитель, играет роль главного узла в РИС, а ЛИС2, ..., ЛИС $n$  являются подчиненными узлами. Информационное взаимодействие между узлами осуществляется посредством ИТКС. Все узлы учитывают каждое изменение состояния своей БД. Такое действие представляет собой отдельную транзакцию. Каждая транзакция в любом узле формирует ЦО, который отправляется на главный узел для создания единого ЦО. Такой механизм позволяет организовать в системе информационное взаимодействие между узлами.

На рис. 3 показан процесс согласования данных, суть которого заключается в подтверждении согласия каждого узла об идентичности своих транзакций в едином ЦО. После того, как главный узел сформировал единый ЦО, он отправляет его на каждый узел для проверки правильности вычисленного результата. Это позволяет достичь необходимого согласования между узлами. Результаты вычисления ЦО с каждого узла отправляются на главный узел для принятия решения о добавления блока. Под «блоком» здесь понимается информационная структура, которая отображает совокупность текущих транзакций. При положительном результате вычисления единого ЦО от всех узлов, под которым понимается получение ЦО от более 50 процентов узлов, главный узел принимает решение на создание блока данных. В противном случае блок данных не создается.

На рисунке 4 показан процесс добавления нового блока в цепочку.

После того, как главный узел сформировал блок, в сеть отправляется решение о добавлении блока к цепочке. Затем каждый узел в сети начинает производить вычисления для добавления блока к цепочке. Для этой цели необходимо вычислить ЦО от цепочки блоков, содержащий единый ЦО от всех текущих транзакций, а также ЦО блока, последнего в цепочке. Узел, на котором в текущий момент времени результат такого вычисления получается быстрее остальных, добавляет блок к цепочке. Затем копия обновленной цепочки блоков рассылается на каждый узел сети. Такой механизм позволяет максимально быстро осуществлять обмен ИР в РИС с требуемой безопасностью данных.

### Критерии построения КРИС на основе блокчейн-технологии

Из рассмотренного выше примера следует вывод о том, что блокчейн-технология позволяет повысить производительность КРИС, обеспечивая при этом необходимую безопасность хранения ИР. Данное обстоятельство обусловлено существенным влиянием производительности на другие свойства КРИС [21–23]. Однако свойство безопасности информации является свойством, которое следует считать находящимся в антагонистическом взаимодействии со свойством производительности сети. Иными словами, увеличение производительности сети, как правило, приводит к ухудшению безопасности информации. С другой стороны, повышение безопасности информации, достигаемое за счет реализации множества программных средств безопасности, как правило, негативно влияет на общую производительность сети.

В этой связи предлагается для решения задачи построения КРИС на основе блокчейн-технологии рассматривать следующее множество возможных вариантов критериев,

учитывающих показатели производительности сети и доступности ИР. В качестве первого показателя предлагается использовать коэффициент своевременности информационного обмена ( $K_{time}$ ), а в качестве второго – коэффициент доступности информационных ресурсов ( $K_{av}$ ). Возможными вариантами критериев решения задачи являются:

- 1)  $K_{time} \rightarrow \max$  при условии  $K_{av} \leq K_{av}^{req}$ ;
- 2)  $K_{av} \rightarrow \max$  при условии  $K_{time} \leq K_{time}^{req}$ ;
- 3) удовлетворение обоим условиям  $K_{time} \leq K_{time}^{req}$  и  $K_{av} \leq K_{av}^{req}$ ,

где  $K_{time}^{req}$  и  $K_{av}^{req}$  – требуемые значения коэффициентов своевременности информационного обмена и доступности информационных ресурсов, соответственно.

В первом варианте критерием задачи является достижение максимальной производительности сети, а доступность информации выносится в ограничение. Этот случай, по мнению авторов, соответствует режиму повседневного функционирования КРИС.

Во втором варианте критерием задачи является достижение максимальной доступности информации, а производительность сети выносится в ограничение. Этот случай, по мнению авторов, соответствует переходному периоду функционирования КРИС.

Наконец, третий вариант может соответствовать режиму критического функционирования системы, когда становятся одинаково важными оба свойства функционирования КРИС, как производительность сети, так и доступность информации.

В качестве переменных задачи следует учитывать параметры, определяющие эффективность блокчейн-технологии. К таковым параметрам предлагается отнести длину блока данных и периодичность обновления распределенного реестра. В таком случае формальная постановка задачи сводится к нахождению таких значений этих параметров, которые обеспечивают реализацию учитываемого при заданном режиме функционирования КРИС варианта критериев задачи.

Так как целевые функции, описывающие порядок расчета показателей производительности сети и доступности информации имеют нелинейный характер и большую размерность, предлагается для решения задачи построить имитационную модель КРИС, в которой реализована блокчейн-технология. С помощью этой модели возможно исследование зависимостей искомых показателей от параметров блокчейн-технологии, на основании которых достигается решение задачи.

### Заключение

Таким образом, применение блокчейн-технологии является перспективным направлением развития теории построения КРИС, позволяющим существенно повысить ее производительность при сохранении требуемого уровня безопасности хранимых ИР, либо, наоборот, повысить безопасность ИР при сохранении требуемой производительности сети.

Для решения этой задачи необходима разработка имитационной модели, учитывающей параметры блокчейн-технологии в КРИС и задаваемые критерии. Эта разрабатываемая модель должна обеспечить управление информационными ресурсами в КРИС в реальном масштабе времени и

по единым принципам вне зависимости от технологических особенностей оборудования и систем связи различных типов. Создание такой модели является дальнейшим направлением исследований.

### Литература

1. *Захарченко Р.И., Королев И.Д., Саенко И.Б.* Синергетический подход к обеспечению устойчивости функционирования автоматизированных систем специального назначения // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 4. С. 207–225.
2. *Котенко И.В., Саенко И.Б., Авраменко В.С.* Концептуальный подход к обеспечению информационной безопасности системы распределенных ситуационных центров // Информатизация и связь. 2019. № 3. С. 37–42. DOI:10.34219/2078-8320-2019-10-3-37-43.
3. *Zhuchkov D., Morozov R.* Heterogeneous Information Systems Interaction // Proceedings of the 2018 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC). 2018. Pp. 1–4. DOI:10.1109/RPC.2018.8482146.
4. *Wang P., Zhao C., Liu W., Chen Zh.* Optimizing Data Placement for Cost Effective and High Available Multi-Cloud Storage // Computing and Informatics. 2020. Vol. 39. No. 1–2. Pp. 51–82. DOI:10.31577/cai\_2020\_1-2\_51.
5. *Zhao Z., Liu Y., Sheng W., Krishna T., Wang Q., Mao Z.* Optimizing the data placement and transformation for multi-bank CGRA computing system // Proceedings of the 2018 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE). 2018. Pp. 1087–1092. DOI:10.23919/DATE.2018.8342173.
6. *Mamatas L., Clayman S., Galis A.* Information Exchange Management as a Service for Network Function Virtualization Environments // IEEE Transactions on Network and Service Management. 2016. Vol. 13. No. 3. Pp. 564–577. DOI:10.1109/TNSM.2016.2587664.
7. *Андреанова Е.Г., Раев В.К., Фильгус Д.И.* Развитие методов параллельных вычислений для фрагментации данных сетевой базы данных на основе рангового подхода // Cloud of Science. 2018. Т. 5. № 3. С. 532–550.
8. *Bau N., Endres S., Gerz M., Gökçöz, F.* A cloud-based architecture for an interoperable, resilient, and scalable C2 information system // Proceedings of the 2018 International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS). 2018. Pp. 1–7. DOI:10.1109/ICMCIS.2018.8398692.
9. *Osadhani Y., Maulana A., Rizkiputra D., Kaburuan E.R., Sfenrianto.* Enterprise Architectural Design Based on Cloud Computing using TOGAF (Case Study: PT. TELIN) // Proceedings of the 2019 International Conference on Sustainable Engineering and Creative Computing (ICSECC). 2019. Pp. 111–115. DOI:10.1109/ICSECC.2019.8907072.
10. *Стоунбрейкер М., Кетинтемел У.* Один размер пригоден для всех: идея, время которой пришло и ушло // Центр информационных технологий. URL: [http://citforum.ru/database/articles/one\\_size\\_fits\\_all/](http://citforum.ru/database/articles/one_size_fits_all/) (дата обращения: 24.11.2020).
11. *Саенко И.Б., Бирюков М.А., Ясинский С.А., Грязев А.Н.* Реализация критериев безопасности при построении единой системы разграничения доступа к информационным ресурсам в облачных инфраструктурах // Информация и космос. 2018. № 1. С. 81–85.
12. *Ul Hassan C.A., Irfan R., Shah M.A.* Integrated Architecture of Data Warehouse with Business Intelligence Technologies // Proceedings of the 2018 24th International Conference on Automation and Computing (ICAC). 2018. Pp. 1–6. DOI:10.23919/ICAC.2018.8749017.
13. *Al Faris F.Z., Suharjito D., Nugroho A.* Development of Data Warehouse to Improve Services in IT Services Company // Proceedings of the 2018 International Conference on Information Management and Technology (ICIMTech). 2018. Pp. 483–492. DOI:10.1109/ICIMTech.2018.8528146.
14. *Kotenko I., Saenko I., Levshun D.* A Model Checking Based Approach for Verification of Attribute-Based Access Control Policies in Cloud Infrastructures // Proceedings of the Fourth International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (ITI’19). ITI 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1156. Springer, Cham. Pp. 331–340. DOI:10.1007/978-3-030-50097-9\_17.
15. *Брюер Л.* Способы повышения производительности, или когда скорость решает все // PHP Magazin. URL: [http://php-mag.net/itr/online\\_artikel/psecom.id.502.node.id.114.html](http://php-mag.net/itr/online_artikel/psecom.id.502.node.id.114.html) (дата обращения: 24.11.2020).
16. *Garani, G., Chernov A., Savvas I., Butakova M.* A Data Warehouse Approach for Business Intelligence // Proceedings of the 2019 IEEE 28th International Conference on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises (WETICE). 2019. Pp. 70–75. DOI:10.1109/WETICE.2019.00022.
17. *Ramkumar M.* A blockchain based framework for information system integrity // China Communications. 2019. Vol. 16. No. 6. Pp. 1–17. DOI:10.29169/JCC.2019.06.001.
18. *Mišić V.B., Mišić J., Chang X.* Towards a Blockchain-Based Healthcare Information System : Invited Paper // Proceedings of the 2019 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). 2019. Pp. 13–18. DOI:10.1109/ICCCChina.2019.8855911.
19. *Chan K.C., Zhou X., Gururajan R., Zhou X., Ally M., Gardiner M.* Integration of Blockchains with Management Information Systems // Proceedings of the 2019 International Conference on Mechatronics, Robotics and Systems Engineering (MoRSE). 2019. Pp. 157–162. DOI:10.1109/MoRSE48060.2019.8998694.
20. *Ma S., Hao W., Dai H., Cheng S., Yi R., Wang T.* A Blockchain-Based Risk and Information System Control Framework // Proceedings of the 2018 IEEE 16th Intl Conf on Dependable, Autonomous and Secure Computing, 16th Intl Conf on Pervasive Intelligence and Computing, 4th Intl Conf on Big Data Intelligence and Computing and Cyber Science and Technology Congress (DASC/PiCom/DataCom/CyberSciTech). 2018. Pp. 106–113. DOI:10.1109/DASC/PiCom/DataCom/CyberSciTec.2018.00031.
21. *Орлик С.* Многоуровневые модели в архитектуре клиент-сервер. URL: <http://delphisite.ru/faq/mnogourovnevye-modeli-v-arkhitekture-klient-server> (дата обращения: 24.11.2020).
22. *Gnatyuk S, Polishchuk Y., Sydorenko V., Sotmichenko Y.* Determining the Level of Importance for Critical Information Infrastructure Objects // Proceedings of the 2019 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T). 2019. Pp. 829–834. DOI:10.1109/PICST47496.2019.9061390.
23. *Potii O., Tsyplinsky Y.* Methods of Classification and Assessment of Critical Information Infrastructure Objects // Proceedings of the 2020 IEEE 11th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT). 2020. Pp. 389–393. DOI:10.1109/DESSERT50317.2020.9125028.

## APPLICATING BLOCKCHAIN TECHNOLOGY IN CRITICAL DISTRIBUTED INFORMATION SYSTEMS: CONCEPTUAL FOUNDATIONS

**IGOR N. FABIJANOVSKIJ**

St. Petersburg, Russia, fabik-spb@yandex.ru,

**VLADIMIR V. NIKOLAEV**

Saint-Petersburg, Russia, fortune-rus@yandex.ru

**IGOR B. SAENKO**

Saint-Petersburg, Russia, ibsaen@mail.ru

**KEYWORDS:** *information technology, information resource, distributed information system, blockchain, hash function.*

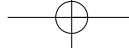
### ABSTRACT

**Introduction:** the most promising approach to the creation of critical distributed information systems is the use of modern information technologies. In this regard, it is of great interest to study the possibilities of building systems of this class based on blockchain technology, which, unlike traditional transactional technology, involves distributed data storage with the formation of a distributed ledger. **Purpose:** the purpose of the research is to develop a conceptual framework for such an approach, covering the features of blockchain technology. **Methods:** the goal is achieved by conducting a comparative analysis of blockchain technology and transactional technology, developing an algorithm for the functioning of the system, determining the order of interaction between governing bodies and forming criteria for building a system based on blockchain technology. **Results:** the results of a comparative analysis showed that the introduction of blockchain technology into critical distributed information systems increases the efficiency of data collection and the availability of information resources stored and transmitted within the system. The developed algorithm for the function-

ing of a distributed information system based on blockchain technology contains three stages, during which, through the use of hash functions, converting the content of the transmitted document into a digital fingerprint and distributing a chain of data blocks across all network nodes, distributed data storage and complete security are ensured. **Practical relevance:** the considered order of interaction between governing bodies and exchange of information resources in a system based on blockchain technology demonstrated the possibility of practical implementation of this technology in a critical distributed information system and made it possible to form criteria for its construction. **Discussion:** as the main criteria, the coefficients of the timeliness of information exchange and the availability of information resources are proposed. To satisfy these criteria, in the search for optimal combinations of parameters for the implementation of blockchain technology, the simulation model of the functioning of a critical distributed information system based on blockchain technology should be used, which is considered as a further research direction.

### REFERENCES

1. Zakhchenko R.I., Korolev I.D., Saenko I.B. Synergetic approach to ensuring the resilience of the functioning of special-purpose automated systems. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Control, communication and security systems]. 2018. No. 4. P. 207-225. (In Rus)
2. Kotenko I.V., Saenko I.B., Avramenko V.S. Conceptual approach to ensuring information security of a system of distributed situational centers. *Informatizacija i svjaz'* [Informatization and communication]. 2019. No. 3. P. 37-42. DOI:10.34219/2078-8320-2019-10-3-37-43. (In Rus)
3. Zhuchkov D., Mozov R.. Heterogeneous Information Systems Interaction. *Proceedings of the 2018 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC)*. 2018. P. 1-4. DOI:10.1109/RPC.2018.8482146.
4. Wang J., Zhao C., Liu W., Chen Zh. Optimizing Data Placement for Cost Effective and High Available Multi-Cloud Storage. *Computing and Informatics*. 2020. Vol. 39. No. 1-2. Pp. 51-82. DOI: 10.31577/cai\_2020\_1-2\_51.
5. Zhao Z., Liu Y., Sheng W., Krishna T., Wang Q., Mao Z. Optimizing the data placement and transformation for multi-bank CGRA computing system. *Proceedings of the 2018 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*. 2018. P. 1087-1092. DOI:10.23919/DATE.2018.8342173.
6. Mamatas L., Clayman S., Galis A. Information Exchange Management as a Service for Network Function Virtualization Environments. *IEEE Transactions on Network and Service Management*. 2016. Vol. 13. No. 3. P. 564-577. DOI:10.1109/TNSM.2016.2587664.
7. Andrianova E.G., Raev A.K., Filgus D.I. Development of Parallel Computing Methods for Fragmentation of Network Database Data Based on the Ranked Approach. *Cloud of Science* [Cloud of Science]. 2018. Vol. 5. No. 3. P. 532-550. (In Rus)
8. Bau N., Enes S., Gerz M., G?kg?z, F. A cloud-based architecture for an interoperable, resilient, and scalable C2 information system. *Proceedings of the 2018 International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS)*. 2018. P. 1-7. DOI:10.1109/ICMCIS.2018.8398692.
9. Osadhani J., Maulana A., Rizkiputra D., Kaburuan E.R., Sfenrianto. Enterprise Architectural Design Based on Cloud Computing using TOGAF (Case Study: PT. TELIN). *Proceedings of the 2019 International Conference on Sustainable Engineering and Creative Computing (ICSECC)*. 2019. P. 111-115. DOI:10.1109/ICSECC.2019.8907072.



10. Stonebreaker M., Ketintemel W. Odin razmer prigoden dlja vseh: ideja, vremena kotoroj prishlo i ushlo [One size fits all: an idea whose time has come and gone]. Centr informacijnyh tehnologij [Information Technology Center]. URL: [http://citforum.ru/database/articles/one\\_size\\_fits\\_all/](http://citforum.ru/database/articles/one_size_fits_all/) (date of access: 24.11.2020). (In Rus)
11. Saenko I.B., Birjukov M.A., Jasinskij S.A., Grjazev A.N. Implementation of security criteria when building a unified system for differentiating access to information resources in cloud infrastructures. *Informacija i kosmos* [Information and space]. 2018. No. 1. P. 81-85. (In Rus)
12. Ul Hassan C.A., Irfan R., Shah M.A. Integrated Architecture of Data Warehouse with Business Intelligence Technologies. *Proceedings of the 2018 24th International Conference on Automation and Computing (ICAC)*. 2018. Pp. 1-6. DOI:10.23919/ICAC.2018.8749017.
13. Al Faris F.Z., Suhajito D., Nugroho A. Development of Data Warehouse to Improve Services in IT Services Company. *Proceedings of the 2018 International Conference on Information Management and Technology (ICIMTech)*. 2018. P. 483-488. DOI:10.1109/ICIMTech.2018.8528146.
14. Kotenko I., Saenko I., Levshun D. A Model Checking Based Approach for Verification of Attribute-Based Access Control Policies in Cloud Infrastructures. *Proceedings of the Fourth International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'19)*. IITI 2019. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Vol. 1156. Springer, Cham. P. 331-340. DOI:10.1007/978-3-030-50097-9\_17.
15. Brewer L. Sposoby povyshenija proizvoditel'nosti, ili kogda skorost' reshaet vse [Ways to improve productivity or when speed is everything]. PHP Magazin [PHP Magazin]. URL: [http://php-mag.net/itr/online\\_artikel/psecom.id.502.node.id.114.html](http://php-mag.net/itr/online_artikel/psecom.id.502.node.id.114.html) (date of access: 24.11.2020). (In Rus)
16. Garani, G., Chernov A., Savas I., Butakova M. A Data Warehouse Approach for Business Intelligence. *Proceedings of the 2019 IEEE 28th International Conference on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises (WETICE)*. 2019. P. 70-75. DOI:10.1109/WETICE.2019.00022.
17. Ramkumar M. A blockchain based framework for information system integrity. *China Communications*. 2019. Vol. 16. No. 6. P. 1-17. DOI:10.23919/JCC.2019.06.001.
18. Mistic V.B., Mistic J., Chang X. Towards a Blockchain-Based Healthcare Information System. *Proceedings of the 2019 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*. 2019. P. 13-18. DOI:10.1109/ICCCChina.2019.8855911.
19. Chan K.C., Zhou X., Gururajan R., Zhou X., Ally M., Gardiner M. Integration of Blockchains with Management Information Systems. *Proceedings of the 2019 International Conference on Mechatronics, Robotics and Systems Engineering (MoRSE)*. 2019. Pp. 157-162. DOI:10.1109/MoRSE48060.2019.8998694.
20. Ma S., Hao W., Dai H., Cheng S., Yi R., Wang T. A Blockchain-Based Risk and Information System Control Framework. *Proceedings of the 2018 IEEE 16th Intl Conf on Pervasive Intelligence and Computing, 4th Intl Conf on Big Data Intelligence and Computing and Cyber Science and Technology Congress (DASC/PiCom/DataCom/CyberSciTech)*. 2018. P. 106-113. DOI:10.1109/DASC/PiCom/DataCom/CyberSciTec.2018.00031.
21. Orlik S. Mnogourovnevyje modeli v arhitekture klient-server [Layered Models in Client-Server Architecture]. URL: <http://delphisite.ru/faq/mnogourovnevyje-modeli-v-arkhitekture-klient-server> (date of access: 24.11.2020). (In Rus)
22. Gnatyuk S, Polishchuk Y., Sydorenko V., Sotnichenko Y. Determining the Level of Importance for the 2019 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T). 2019. P. 829-834. DOI: 10.1109/PICST47496.2019.9061390.
23. Potii O., Tsyplinsky Y. Methods of Classification and Assessment of Critical Information Infrastructure Objects. *Proceedings of the 2020 IEEE 11th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*. 2020. P. 389-393. DOI:10.1109/DESSERT50317.2020.9125028.

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS:

**Igor N. Fabijanovskij**, Postgraduate student of the Military Telecommunication Academy, St. Petersburg, Russia  
**Vladimir V. Nikolaev**, Postgraduate student of the Military Telecommunication Academy, St. Petersburg, Russia  
**Igor B. Saenko**, Ph.D., Full Professor, Professor of the Military Telecommunication Academy, St. Petersburg, Russia

---

**For citation:** Fabijanovskij I.N., Nikolaev V.V., Saenko I.B. Application of blockchain technology in critical distributed information systems: conceptual foundations. *H&ES Research*. 2021. Vol. 13. No. 4. Pp. 56-64. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-4-56-64 (In Russian)



**ГЛАВНОЕ**

СОБЫТИЕ ОТРАСЛИ  
ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

**24й НАЦИОНАЛЬНЫЙ ФОРУМ  
ИНФОРМАЦИОННОЙ  
БЕЗОПАСНОСТИ**

# ИНФО ФОРУМ 2022



Здание Правительства Москвы  
ул. Новый Арбат, 36

**3-4  
февраля**

**РОССИЯ В ЦИФРОВУЮ ЭПОХУ:  
ПРЕОДОЛЕНИЕ РИСКОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

[infoforum.ru](http://infoforum.ru)

doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-4-66-75

# ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗАГРУЗКИ ВИРТУАЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

**ШЕМЯКИН**

**Сергей Николаевич<sup>1</sup>**

**ПЕСТОВ**

**Игорь Евгеньевич<sup>2</sup>**

**ИЛЬИН**

**Максим Владимирович<sup>3</sup>**

**РУДЧЕНКО**

**Никита Андреевич<sup>3</sup>**

## Сведения об авторах:

<sup>1</sup>к.т.н., доцент кафедры защищённых систем связи, Санкт-Петербургского Государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург, Россия, s4421764@yandex.ru

<sup>2</sup>старший преподаватель кафедры защищённых систем связи, Санкт-Петербургский Государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург, Россия, Pestovie@outlook.com

<sup>3</sup>студент Санкт-Петербургского Государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург, Россия, forses3@mail.ru

<sup>4</sup>студент Санкт-Петербургского Государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург, Россия, rudebxy@yandex.ru

## АННОТАЦИЯ

**Введение:** В наши дни виртуализация используется повсеместно, а особенно необходима для создания сетевой и серверной инфраструктуры предприятия. Без проведения математического прогнозирования невозможно точно предугадать поведение инфраструктуры через какой-то период времени. **Цель исследования:** Оценить точность трех различных моделей прогнозирования: ARIMA, SARIMA, ARIMAX, на краткосрочный, среднесрочный и долгосрочный периоды. **Методы:** Для оценки использовался классический сравнительный анализ, в качестве критериев использовались средняя абсолютная ошибка, а так же точность прогнозирования. **Результаты:** Рассмотрено описание математических моделей Авторегрессионного интегрированного скользящего среднего, а так же расширенная модель Авторегрессионного интегрированного скользящего среднего и сезонной модели Авторегрессионного интегрированного скользящего среднего. На основании математического описания было произведено изучение методов прогнозирования и их сравнение. Затем методы математического прогнозирования были реализованы программно, построены графики, проведено сравнение и был выявлен лучший из них для прогнозирования поведения сетевой инфраструктуры. Проведенные тесты показали, что модель Авторегрессионного интегрированного скользящего среднего прогнозирует поведение сетевой инфраструктуры на неделю, расширенная модель Авторегрессионного интегрированного скользящего среднего прогнозирует поведение сетевой инфраструктуры на месяц, а сезонная модель Авторегрессионного интегрированного скользящего среднего прогнозирует поведение сетевой инфраструктуры на год. **Практическая значимость:** Полученные результаты по итогам моделирования математического прогнозирования Бокса-Дженкинса имеют широкое практическое применение для мониторинга загрузки элементов виртуальной инфраструктуры, с целью предотвращения сбоев в работе системы и отслеживания аномалий. **Обсуждение:** Использование данных моделей Авторегрессионного интегрированного скользящего среднего и его модификаций позволит существенно повысить точность определения аномалий, что повышает эффективность использования ресурсов и безопасность инфраструктуры.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *arima, arimax, sarima, прогнозирование, временные ряды.*

---

**Для цитирования:** Шемякин С. Н., Пестов И. Е., Ильин М. В., Рудченко Н. А. Теоретическая оценка использования математических методов прогнозирования загрузки виртуальной инфраструктуры // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 4. С. 66-75. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-4-66-75

**Введение**

Временные ряды (Time series) предоставляют возможность прогнозирования будущих значений. На основании значений, полученных ранее, временные ряды используются для прогнозирования в любых сферах, таких как: поведение вычислительных сетей [1], прогнозирование экономических процессов, прогнозирование атак [2], планирование пропускных способностей и т.д.

В данной статье описывается сравнение методов прогнозирования, основанных на построении временных рядов на примере ARIMA (Autoregressive integrated moving average, интегрированная модель авторегрессии скользящего среднего), ARIMAX (Autoregressive integrated moving average extended, расширенная интегрированная модель авторегрессии скользящего среднего) и SARIMA (seasonal ARIMA, сезонная ARIMA) для долгосрочного прогнозирования поведения сетевой инфраструктуры [3].

**Модель ARIMA**

Модель авторегрессионного интегрированного скользящего среднего относится к одному из наиболее часто используемых методологических подходов для однофакторного прогнозирования временных рядов. ARIMA позволяет подойти к вопросу прогнозирования и анализу временных рядов очень гибко и получить точные данные [4].

Модель ARIMA позволяет анализировать одномерные стохастические временные ряды. Для этого анализируемый временной ряд должен быть стационарным, т.е. среднее значение, дисперсия и ковариация ряда должны быть постоянными во времени.

Модель ARIMA (с сезонными терминами) может быть записана следующим образом:

$$y_t = \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + \dots + \phi_p y_{t-p} + \Phi_1 y_{t-s} + \Phi_2 y_{t-2s} + \dots + \Phi_p y_{t-ps} + \alpha_t - \theta_1 \alpha_{t-1} - \theta_2 \alpha_{t-2} - \dots - \theta_q \alpha_{t-q} - \Theta_1 \alpha_{t-s} - \Theta_2 \alpha_{t-2s} - \dots - \Theta_Q \alpha_{t-Qs} \quad (1)$$

Используя оператор backshift (lag), можно переписать (1):

$$\phi_p(B) \Phi_p(B^s) z_t = \theta_q(B) \Theta_Q(B^s) \alpha_t \quad (2)$$

где

$$z_t = (1 - B)^d (1 - B^s)^D \ln(y_t) \quad (3)$$

$\phi_p(B)$  – несезонный оператор авторегрессии одного процесса AR(p);

$\theta_q(B)$  – несезонный оператор скользящего среднего MA(q);

$\Phi_p(B^s)$  – сезонный оператор авторегрессионного процесса AR(P);

$\Theta_Q(B^s)$  – сезонный оператор скользящего среднего MA(Q);

$\alpha_t$  – белый шум;

S – порядок сезонности ( $B^s y_t = y_{t-s}$ );

d, D – несезонный и сезонный порядок дифференцирования (интегрирование).

Затем, используя более экономную нотацию, мы можем переписать следующим образом (4):

$$ARIMA(p, d, q)(P, D, Q)_s, \quad (4)$$

где:

p, P – число параметров авторегрессии;

q, Q – количество параметров скользящей средней.

Подход бокса-Дженкинса является итерационным трех-этапным подходом моделирования: идентификация, оценка и диагностическая проверка и прогнозирование.

На этапе идентификации исследователь визуально исследует временной график функции автокорреляции ряда (ACF) и частичной функции автокорреляции (PACF). Построение графиков каждого наблюдения ряда против времени t содержит полезную информацию, касающуюся выбросов, пропущенных значений и структурных разрывов в данных. Анализируемый временной ряд должен быть стационарным. После того, как стационарность была достигнута (логарифм и/или различия), следующим шагом является определение параметров модели, т. е. AR и Ма порядков, исследующих ACF и PACF.

На этапе оценки оценивается каждая из предварительных моделей и рассматриваются различные коэффициенты. Сравнение оценочных моделей производится с использованием информационного критерия Акайке, а для получения экономной модели выбирается байесовский критерий Шварца и модель с наименьшим критерием. Основными подходами к подбору моделей бокса-Дженкинса являются нелинейная оценка наименьших квадратов и максимального правдоподобия.

На этапе диагностической проверки проверяется правильность подгонки модели. Остатки должны соответствовать допущениям белого шума, т. е. проверяется автокорреляция, гомоскедастичность и нормальность. Если эти предположения не выполняются, то необходимо подогнать более подходящую модель [5]. Здесь нужно быть осторожным, чтобы не переборщить.

Основной функцией моделей ARIMA является прогнозирование. Их способность к прогнозированию может быть рассмотрена при сравнении с фактическими временными рядами.

**ARIMAX-модель передаточной функции**

Предположим, что два временных ряда обозначены  $Y_t$  и  $X_t$ , оба являются стационарными. Модель передаточной функции (TFM) можно записать следующим образом (5):

$$Y_t = C + v(B)X_t + N_t \quad (5)$$

где:

$Y_t$  – выходной ряд (зависимая переменная);

$X_t$  – входной ряд (независимая переменная);

C – постоянный член;

$N_t$  – стохастическое возмущение, т. е. Шумовой ряд системы, который не зависит от входного ряда.

$v(B) X_t$  является передаточной функцией (или функцией импульсного отклика), которая позволяет  $X$  влиять на  $Y$  через распределенное отставание.

В является оператором обратного переключения, поэтому мы можем написать (6):

$$v(B)X_t = (v_0 + v_1 B + v_2 B^2 + \dots)X_t \quad (6)$$

Когда предполагается, что  $X_t$  и  $N_t$  следуют модели ARMA, уравнение (15) называется моделью ARMAX. Эта модель ARMAX сильно отличается от модели ARMA, пото-

му что мы работаем с двумя разными сериями  $X_t$  и  $Y_t$  – выходной ряд  $Y_t$  связан с входным рядом  $X_t$ .

Коэффициенты  $v_j$  называются весами импульсного отклика, которые могут быть положительными или отрицательными. Чем больше абсолютное значение любого веса  $v_j$ , тем больше отклик  $Y_t$  на изменение  $X_{t-d}$ . Выходные ряды могут не реагировать сразу на изменение входных рядов, поэтому некоторые начальные значения  $v$  могут быть равно нулю. Число весов  $v$ , равных нулю, называется мертвым временем и обозначается как  $b$ .

Теоретически передаточная функция  $v(B)X_t$  имеет бесконечное число коэффициентов. Тогда мы можем записать передаточную функцию как рациональную модель многочленов с распределенным лагом конечного порядка как отношение многочленов низкого порядка в  $B$  (7):

$$v(B)X_t = \frac{\omega_h(B)B^b}{\delta_r(B)} X_t \quad (7)$$

Где  $\omega_h(B) = \omega_0 + \omega_1 B + \dots + \omega_h B^h$ ;  $\delta_r(B) = 1 - \delta_1 B - \dots - \delta_r B^r$ ;  $h$  – число слагаемых плюс одна включенная независимая переменная;  $r$  – это число членов включенной зависимой переменной, а  $b$  – уже упоминавшееся мертвое время.

Ряд  $N_t$  можно записать в виде модели авторегрессионной интегрированной скользящей средней следующим образом (8):

$$N_t = \frac{\theta(B)\Theta(B^S)}{\phi(B)\Phi(B^S)(1-B)^d(1-B^S)^D} \alpha_t \quad (8)$$

где  $\alpha_t$  является нулевым средним и нормально распределенным белым шумом.

Затем, заменив (7) с максимальным запаздыванием, обозначенным через  $K$  (модель распределенного запаздывания свободной формы) и (9) в (5), мы получим модель передаточной функции в ее полной формуле (9):

$$Y_t = C + v_0 X_t + v_1 X_{t-1} + v_2 X_{t-2} + \dots + v_k X_{t-k} + \frac{\theta(B)\Theta(B^S)}{\phi(B)\Phi(B^S)(1-B)^d(1-B^S)^D} \alpha_t \quad (9)$$

Построение TFM аналогично итеративному процессу, как и построение одномерной модели ARIMA Бокса-Дженкинса, то есть идентификация, оценка и диагностика. После проверки отсутствия обратной связи от более ранних значений выходных данных до текущих значений входных данных, мы можем начать с метода идентификации линейного переноса (LTF), чтобы выяснить порядки  $(b, r, h)$  передаточной функции рациональной формы (Панкрац). Сначала мы указываем модель распределенного лага в произвольной форме, в которой  $K$  выбирается в соответствии с мнением аналитика, а затем указываем низкий порядок для ряда возмущений  $N_t$ . Нелинейный метод наименьших квадратов может быть использован для оценки параметров. После оценки модели мы должны проверить оцененные ряды помех для стационарности с помощью функции автокорреляции выборки и функции частичной автокорреляции выборки. Если ряд возмущений не является стационарным, то необходимо соответствующим образом различать вход и выход. Если возмущение является стационарным, то мы переходим к этапу 2, где мы можем использовать предварительно оцененные весовые коэффициенты импульсной характеристики, чтобы выбрать порядки  $(b, r, h)$  одной / нескольких предварительных передаточных функций рациональной формы для

представления  $v(B)$ . Мы можем определить порядки  $(b, r, h)$ , визуальным сравнением оцененную функцию импульсного отклика с некоторыми общими теоретическими функциями. Если модель линейной передаточной функции адекватна, то мы можем вычислить прогнозы. Существует несколько диагностических проверок, чтобы решить, является ли модель адекватной на основе невязок, которые должны быть независимыми, а также входных рядов, например, проверка взаимной корреляции и / или проверка автокорреляции [6].

Хорошей практикой является построение модели ARIMA как для выходных, так и для входных рядов, прежде чем пытаться построить модель передаточной функции [7].

### Модель SARIMA

Сезонность во временном ряду – регулярный шаблон изменений, который повторяется в течение  $S$  периодов времени, где  $S$  определяет количество периодов времени, пока шаблон не повторяется снова.

В сезонной модели ARIMA прогнозируются сезонные термины AR и MA использование значений данных и ошибок время от времени с лагами, кратными  $S$  (диапазон сезонности).

Можно преобразовать нестационарные ряды в стационарные, принимая регулярные разности, то есть разность от одного периода по отношению к следующему.

Также можно устранить сезонность с помощью сезонных различий.

Объединяя оба результата, заключаем, что, можно преобразовать нестационарный ряд с сезонностью в стационарный, используя преобразование (10):

$$\omega_t = \nabla_s^D \nabla^d z_t \quad (10)$$

где  $D$  – количество сезонных различий (если есть сезонность, у нас почти всегда есть  $D = 1$ , если нет сезонности  $D = 0$ ), а  $d$  – количество регулярных разностей ( $d \leq 3$ ).

При наличии сезонной зависимости можно обобщить модель ARMA для стационарных рядов, включающую как регулярную зависимость, которая связана с интервалами измерения ряда, так и сезонную зависимость, связанную с наблюдениями, разделенными  $s$  периодами.

Простой подход, который хорошо работает на практике, состоит в том, чтобы моделировать регулярную и сезонную зависимость отдельно, а затем построить модель, включающую оба параметра мультипликативно. Таким образом, получается мультипликативная сезонная модель ARIMA, которая имеет вид (11):

$$\Phi_p(B^S)\phi_p(B)\nabla_s^D \nabla^d z_t = \theta_q(B)\Theta_q(B^S)\alpha_t \quad (11)$$

где

- $\Phi_p(B^S) = (1 - \Phi_1 B^S - \dots - \Phi_p B^{SP})$  – сезонный AR оператор порядка  $P$
- $\phi_p = (1 - \phi_1 B - \dots - \phi_p B^P)$  – оператор AR порядка  $p$
- $\nabla_s^D = (1 - B^S)^D$  представляет сезонные различия и  $\nabla^d = (1 - B)^d$  регулярные различия
- $\Theta_q(B^S) = (1 - \Theta_1 B^S - \dots - \Theta_q B^{SQ})$  – сезонный скользящий средний оператор порядка  $Q$
- $\theta_q(B) = (1 - \theta_1 B - \dots - \theta_q B^q)$  – регулярный скользящий средний оператор порядка  $q$
- $\alpha_t$  – белый шум

### Сравнительный анализ эффективности прогнозирования моделей ARIMA, ARIMAX и SARIMA

В предыдущей главе были рассмотрены следующие математические модели прогнозирования: ARIMA, ARIMAX и SARIMA, а также было выполнено их сравнение. В результате данного сравнения был сделан вывод о том, что для прогнозирования на краткосрочный период времени такой, как неделя, наиболее подходящей моделью прогнозирования является ARIMA, для месячного прогноза наиболее предпочтительной моделью будет ARIMAX, а для прогноза на более долгие промежутки времени – SARIMA[8].

Для выполнения целей данной выпускной квалификационной работы был произведен мониторинг загрузки центрального процессора сервера тестового Интернет-ресурса.

Для реализации задач, поставленных в данной работе, необходимо выполнить сравнение математических моделей на описанных выше промежутках времени анализа данных, а именно: неделя, месяц и год, а также оценить точность прогнозирования, каждой из моделей[9;10].

#### Метод оценки точности

Пусть ошибка есть разность:  $e_t = y_t - \hat{y}_t$ , где  $y_t$  – фактические значения ряда данных загрузки процессора, а  $\hat{y}_t$  – значения, прогнозируемые математической моделью.

Тогда формулу для оценки ошибки прогнозирования временных рядов для N отчетов можно записать в следующем виде (12):

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \frac{|e_t|}{y_t} \cdot 100\% \quad (12)$$

где MAPE (Mean Absolute Percentage Error) – средняя абсолютная ошибка в процентах.

Использование средней абсолютной ошибки в качестве функции потерь для регрессионного анализа осуществимо как с практической, так и с теоретической точки зрения, на основании того, что можно доказать существование оптимальной модели и согласованность минимизации эмпирического риска. Данная величина оценивает насколько велики отклонения в сравнении со значением ряда и с ошибками в соседних рядах.

Несмотря на эффективность данного метода существует возможность затруднения расчета значения средней абсолютной ошибки для ряда небольших знаменателей. Может возникнуть проблема сингулярности вида «единица, деленная на ноль» и / или создание критических изменений абсолютной ошибки процента, вызванных небольшим отклонением ошибки. В свою очередь недостатки данного метода проявляются при расчете ошибки для ряда данных, принимающих большие количественные значения, в таком случае средняя абсолютная ошибка не имеет верхнего предела [11]. А также принимая во внимание тот факт, что значения данных загрузки процессора находятся в интервале от 0 до 100 %, рассмотренные выше недостатки подсчета ошибки не будут влиять на правильность подсчета точности математической модели [12].

Анализ преимуществ и недостатков данного метода оценки ошибки прогнозирования математической модели позволяет прийти к выводу о целесообразности его использования в данной выпускной квалификационной работе.

Точность прогнозирования – понятие прямо противоположное ошибке прогнозирования. Если ошибка прогнозирования велика, то точность мала и наоборот, если ошибка прогнозирования мала, то точность велика. Оценка средней абсолютной ошибки прогноза есть обратная величина для точности прогнозирования.

Исходя из совокупности вышеперечисленного, формула оценки точности, выраженная в процентах, принимает следующий вид (13):

$$Accuracy = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \frac{y_t}{|e_t|} \cdot 100\% \quad (13)$$

Важно отметить, что величина MAPE является количественной характеристикой ошибки, по которой можно судить и о точности прогнозирования, исходя из приведенной выше простой формулы. Таким образом, оценка величины ошибки подразумевает под собой оценку точности прогнозирования.

Опираясь на данный метод оценки точности прогнозирования необходимо понимать, что формула не учитывает сторонние факторы, влияющие на производительность процессора, такие как: многоядерность, температура процессора, тактовая частота процессора, скорость доступа к внешней памяти, скорость выполнения и набор инструкций, работа стороннего программного обеспечения т. д., вследствие того, что разработка метода оценки погрешности прогнозирования математических моделей не входит в задачи данной выпускной квалификационной работы[13].

#### Прогнозирование трафика на неделю

Для получения экспериментальных данных использовался пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений MATLAB и интерактивный инструмент для анализа одномерных данных временных рядов Econometric Modeler App[14;15].

Econometric Modeler App подходит для визуализации и преобразования данных, выполнения тестов статистической спецификации и идентификации моделей, приведения моделей к данным и повторения этих действий, а также для метода Бокса-Дженкинса к построению моделей временных рядов[16].

График данных, на основании которых происходило обучение каждой из моделей (ARIMA, ARIMAX и SARIMA) представлен в Приложении А.

На рисунке 1 изображены графики реальных данных загрузки процессора и прогнозируемых моделью ARIMA значений на неделю вперед[17].

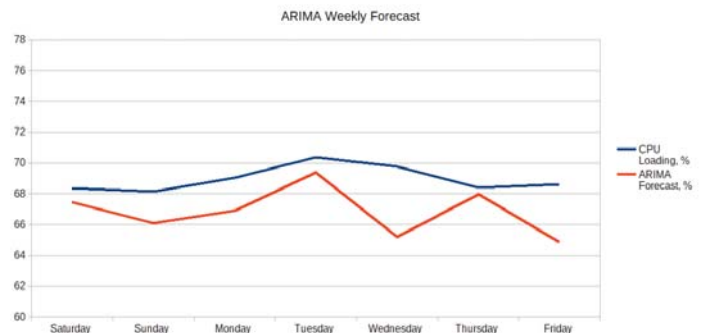


Рис. 1. Прогноз модели ARIMA на неделю

Оценка точности математических моделей прогнозирования на каждом временном интервале основывалась на вышеописанной теории о средней абсолютной ошибке и ее связи с точностью прогнозирования.

Средняя абсолютная ошибка модели ARIMA на недельном интервале прогнозирования равна 3.07 %, точность прогнозирования – 96.93 %[17].

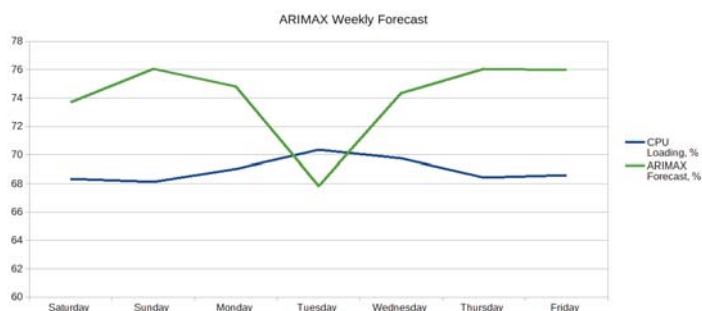


Рис. 2. Прогноз модели ARIMAX на неделю

На рисунке 2 изображены графики реальных данных загрузки процессора и прогнозируемых моделью ARIMAX значений на неделю вперед.

Средняя абсолютная ошибка модели ARIMAX на недельном интервале прогнозирования равна 8.56% из чего можно сделать вывод о том, что точность прогнозирования составляет 91.44%.

На рисунке 3 изображены графики реальных данных загрузки процессора и прогнозируемых моделью SARIMA значений на неделю вперед.

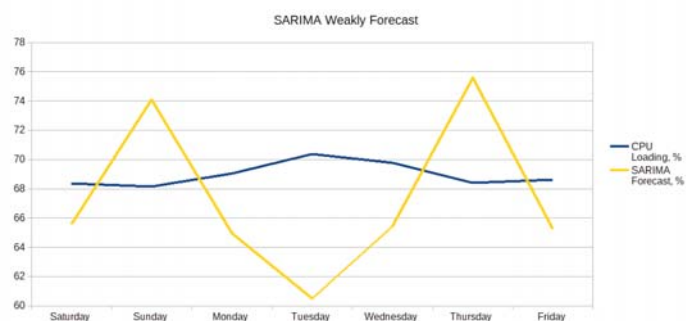


Рис. 3. Прогноз модели SARIMA на неделю

Средняя абсолютная ошибка модели SARIMA на недельном интервале прогнозирования равна 7.77%, точность прогнозирования – 92.23%.

Совокупность результатов прогнозирования для интервала времени равного неделе представлены на рисунке 4. Анализируя данный Рис. можно прийти к необходимости введения понятия «выброс». Выброс – это достаточно большое отклонение прогнозируемых данных от истинных, в рамках интервала изменения истинных данных за исследуемый период.

Например, модель ARIMAX прогнозирует значение загрузки центрального процессора в воскресенье равное 76.06%, при этом разность между прогнозируемыми и истинными данными превышает интервал изменения истинных значений на 354%. Аналогично вышеописанному,

модель SARIMA во вторник принимает значение 60.49 % при истинном – 70.38 %, отклонение при этом превышает интервал на 442 %[18;19].

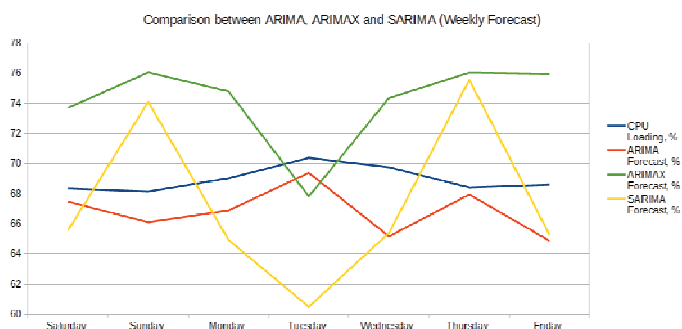


Рис. 4. Сравнение поведения моделей на недельном промежутке прогнозирования

Модель ARIMAX имеет 5 случаев критического отклонения от интервала изменения при среднем отклонении равном 263%, модель SARIMA – 4 случая при среднем отклонении – 240 %, в то время как модель ARIMA – 1 случай при среднем 95%.

Необходимо понимать, что данная методология обнаружения выбросов показывает свою эффективность на коротких периодах прогнозирования при несущественном изменении данных [18].

Результаты расчета средней абсолютной ошибки и точности недельного прогноза каждой математической модели приведены в таблице 1.

Таблица 1

Сравнение точности прогноза моделей на неделю

Модель	ARIMA	ARIMAX	SARIMA
Средняя абсолютная ошибка, %	3.07	8.56	7.77
Точность прогнозирования, %	96.93	91.44	92.23

Анализ графика и таблицы сравнения точности прогнозирования моделей позволяет сделать следующий вывод: на промежутке прогнозирования равном неделе, наиболее подходящей математической моделью является ARIMA, которая не только показывает наибольшую точность прогноза, что соответствует наименьшей средней абсолютной ошибке, но и имеет наименьшее число «выбросов».

### Прогнозирование трафика на месяц

При прогнозировании на большой промежуток времени использование вышеописанного метода обнаружения выбросов не является эффективным в силу того, что интервал изменения данных увеличивается и на фоне высокой точности прогноза перестает быть наглядным показателем стабильности поведения модели [19].

В связи с вышеизложенным, оценка прогноза по количеству выбросов и среднему отклонению интервала разности между истинным и прогнозируемым значением от интервала изменения данных производится не будет.

При этом необходимо акцентировать внимание на том, что использованный в предыдущем разделе метод обнару-

жения выбросов является грубой оценкой стабильности поведения модели на коротком промежутке времени и нуждается в существенной доработке, что требует применения дополнительной математической модели для выявления критических отклонений прогнозируемых данных от их истинных значений, что в свою очередь не входит в задачи данной выпускной квалификационной работы.

На рисунке 5 изображены графики реальных данных загрузки процессора и прогнозируемых моделью ARIMA значений на месяц вперед.

Исходя из результатов, предсказанных моделью ARIMA, можно сделать вывод о том, что при высокой точности прогнозирования на неделю вперед, точность предсказания на месяц уменьшается, несмотря на верное положение точек перегиба.

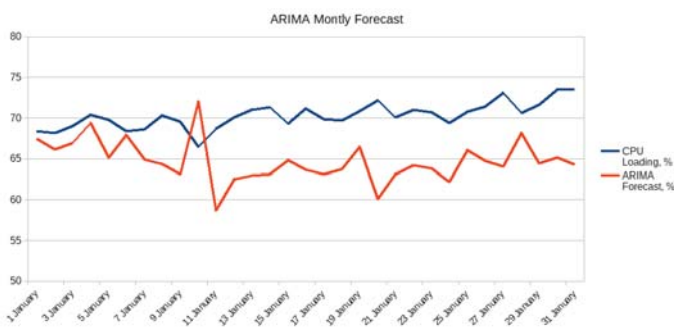


Рис. 5. Прогноз модели ARIMA на месяц

Средняя абсолютная ошибка модели ARIMA на месячном интервале прогнозирования равна 8.35 % из чего можно сделать вывод о том, что точность прогнозирования составляет 91.65%.

На рисунке 6 изображены графики реальных данных загрузки процессора и прогнозируемых моделью ARIMAX значений на месяц вперед.

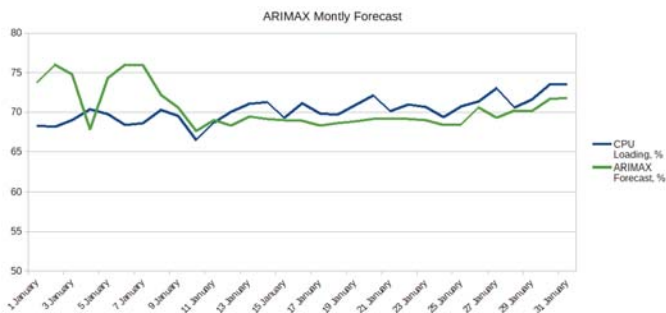


Рис. 6. Прогноз модели ARIMAX на неделю

Проанализировав полученные результаты, представленные на графике, целесообразно сделать вывод, что наличие значительного количества «выбросов» на недельном промежутке, не оказывает существенного влияния на точность прогнозирования на интервале времени равном месяцу, количество видимых отклонений сводится к минимуму [20].

Средняя абсолютная ошибка модели ARIMAX на месячном интервале прогнозирования равна 3.64 %, точность прогнозирования – 96.36%.

На рисунке 6 изображены графики реальных данных загрузки процессора и прогнозируемых моделью SARIMA значений на месяц вперед.

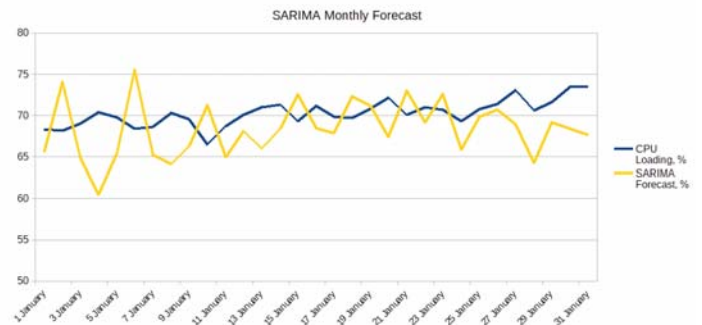


Рис. 7. Прогноз модели SARIMA на месяц

Средняя абсолютная ошибка модели SARIMA на месячном интервале прогнозирования равна 5.35 % из чего можно сделать вывод о том, что точность прогнозирования составляет 94.65%.

Совокупность результатов прогнозирования для интервала времени равного месяцу представлены на рисунке 8.

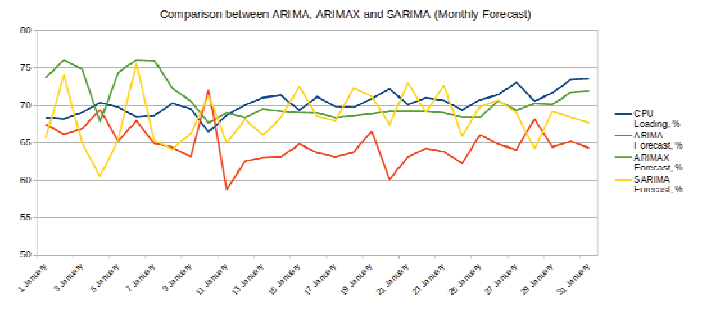


Рис. 8. Сравнение поведения моделей на месячном промежутке прогнозирования

Результаты расчета средней абсолютной ошибки и точности месячного прогноза каждой математической модели приведены в таблице 2.

Таблица 2

Сравнение точности прогноза моделей на месяц

Модель	ARIMA	ARIMAX	SARIMA
Средняя абсолютная ошибка, %	8.35	3.64	5.35
Точность прогнозирования, %	91.65	96.36	94.65

В результате сравнения точности прогнозирования моделей ARIMA, ARIMAX и SARIMA на месяц вперед можно сделать вывод о том, что модель ARIMAX является наиболее эффективной на данном промежутке прогнозирования [20].

### Прогнозирование графика на год

На рисунке 9 изображены графики реальных данных загрузки процессора и прогнозируемых моделью ARIMA значений на год вперед.

Проанализировав результаты годового прогноза, построенного с использованием модели ARIMA и, принимая во внимание тот факт, что его точность по сравнению с месячным предсказанием повысилась на 2.02% (с 91.65% до 93.67%), необходимо отметить, что данный прогноз позволяет охарактеризовать динамику изменения данных: восходящую или нисходящую, игнорируя существенное увеличение загрузки процессора в период с мая по август: с 75 до 99%, а также ее снижение до 65% в ноябре [21;22].

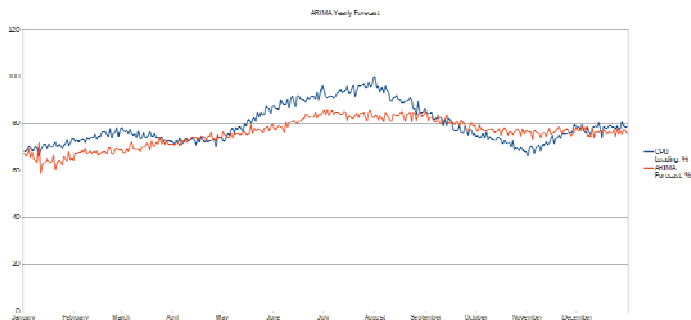


Рис. 9. Прогноз модели ARIMA на год

Средняя абсолютная ошибка модели ARIMA на годовом интервале прогнозирования равна 6.33% из чего можно сделать вывод о том, что точность прогнозирования составляет 93.67%.

На рисунке 10 изображены графики реальных данных загрузки процессора и прогнозируемых моделью ARIMAX значений на год вперед.

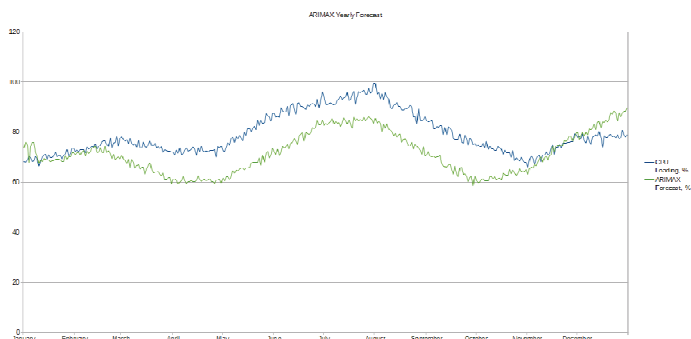


Рис. 10. Прогноз модели ARIMAX на год

Модель ARIMAX показывает характер изменения данных и учитывает периоды их существенного изменения, тем не менее показывая снижение точности прогнозирования до 88.98%, при значении средней абсолютной ошибки равном 11.02%.

На рисунке 11 изображены графики реальных данных загрузки процессора и прогнозируемых моделью SARIMA значений на год вперед.

Прогноз, полученный с помощью модели SARIMA, практически повторяет график истинных данных, а именно: позволяет определить промежутки значительного изменения данных, сохраняя при этом высокую точность.

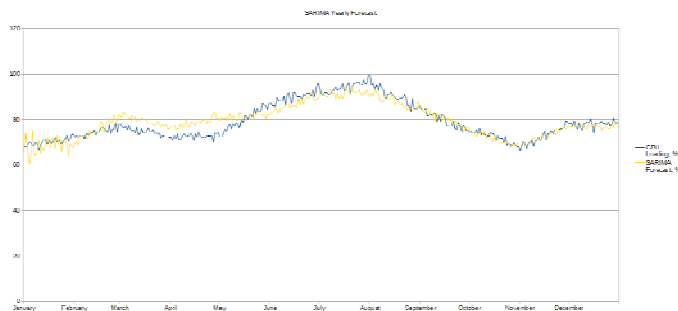


Рис. 11. Прогноз модели SARIMA на год

Средняя абсолютная ошибка модели SARIMA на годовом интервале прогнозирования равна 3.72%, точность прогнозирования – 96.28%.

Совокупность результатов прогнозирования для интервала времени равного году представлены в Приложении Б.

Результаты расчета средней абсолютной ошибки и точности годового прогноза каждой математической модели приведены в таблице 3.

Таблица 3

Сравнение точности прогноза моделей на год

Модель	ARIMA	ARIMAX	SARIMA
Средняя абсолютная ошибка, %	6.33	11.02	3.72
Точность прогнозирования, %	93.67	88.98	96.28

Из вышеописанного становится очевидным, что SARIMA является наиболее эффективной математической моделью на годовом промежутке, обеспечивая низкий показатель средней абсолютной ошибки, что соответствует высокой точности прогноза.

### Заключение

В данной работе рассмотрена актуальность использования математических методов прогнозирования загрузки ресурсов в современной виртуализированной инфраструктуре. Достаточно сложно представить информационную инфраструктуру без систем облачного хранения данных и виртуализации. Переход компаний к использованию виртуальной инфраструктуры упрощает резервное копирование данных, а также обеспечивает наибольшую эффективность управления ресурсами.

Была изучена проблема разработки метода использования математической модели, выполняющего прогнозирование загрузки ресурсов элементов виртуальной инфраструктуры, рассмотрены различия между моделью и методом прогнозирования.

Во избежание возможных последствий эксплуатации виртуальной инфраструктуры, были рассмотрены следующие математические модели прогнозирования: ARIMA, ARIMAX и SARIMA, на основании которых можно разработать систему прогнозирования загрузки элементов виртуальной инфраструктуры, позволяющую минимизировать сбои в работе системы, обусловленные нехваткой того или иного ресурса, а также отслеживать наличие аномалий в поведении сети с целью выявления атак.



Данная система предполагает использование пакета прикладных программ для работы с временными рядами с целью выявления математической модели способной прогнозировать распределение вычислительных ресурсов с высокой точностью на продолжительный период времени.

В рамках проведенного анализа алгоритма системы прогнозирования загрузки виртуальной инфраструктуры были получены следующие основные результаты: математическая модель ARIMA достоверно прогнозирует трафик на неделю вперед, модель ARIMAX – на месяц, а модель SARIMA – на год.

Полученные результаты имеют широкое практическое применение для мониторинга загрузки элементов виртуальной инфраструктуры, с целью предотвращения сбоев в работе системы и отслеживания аномалий, что повышает эффективность использования ресурсов и безопасность инфраструктуры.

### Литература

1. Акимов Ю.А. Прогнозирование на базе ARIMA – моделей // Интеграция науки, общества, производства и промышленности. (Иркутск, 27 ноября 2019 г.) 2019. С. 5-7.
2. Палий Э.И., Хашковский В.В. Применение ARIMA-модели для построения прогноза. // Информационные технологии, системный анализ и управление (ИТСАУ-2016). 2016. С. 163-165.
3. Малыгин А.А., Моделирование показателей молочного скотоводства на основе тренд-сезонной модели и агта-процессов бокса-дженкина // Наука о данных, Санкт-Петербург, 2020 С. 190-192.
4. Афанасьева Т.В., Сапунков А.А., Заварзин Д.В., Сибирев И.В., Морозов А.А., Сервис прогнозирования на основе комбинирования моделей нечетких временных рядов и агта // Пятнадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием. (Смоленск, 03–07 октября 2016 года). С. 229-236.
5. Гельфанд А.М., Лансере Н.Н., Ложкина А.А., Фадеев И.И. Организация концептуальной модели критической информационной инфраструктуры // Методы и технические средства обеспечения безопасности информации. 2020. № 29. С. 39-40.
6. Багомедова А.Р., Ушаков И.А., Цветков А.Ю., Разработка методов проверки соответствия серверов виртуализации требованиям безопасности согласно стандарту гост р 56938-2016 // Материалы VII Международной научно-технической и научно-методической конференции. «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании», (Санкт-Петербург, 28 февраля – 01 2018 года), С. 58-63
7. Сахаров Д.В., Красов А.В., Ушаков И.А., Орлов Г.А., защищенная модель программно-определяемой сети в среде виртуализации KVM. // Электросвязь. 2020. № 3. С. 26-32.
8. Гайфулина Д.А., Котенко И.В. Анализ моделей глубокого обучения для задач обнаружения сетевых аномалий интернета вещей // Информационно-управляющие системы. 2021. № 1 (110). С. 28-37.
9. Авдеева М.Л., Ушаков И.А., Филиппов А.А. Сравнительный анализ концепции облачной инфраструктуры openstack и традиционной архитектуры виртуализации // Материалы IX Международной научно-технической и научно-методической конференции (Санкт-Петербург, 01–03 ноября 2017 года), Санкт-Петербург, 2017. С. 33-38
10. Дубровин Н.Д., Ушаков И.А., Чечулин А.А. Применение технологии больших данных в системах управления информацией и событиями безопасности // Материалы из конференции “Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании” (Санкт-Петербург, 10–11 марта 2016 г.) Санкт-Петербург, 2016. С. 348-353.
11. Красов А.В., Левин М.В., Фостач Е.С., проблемы обеспечения безопасности облачных вычислений // Материалы X Санкт-Петербургской межрегиональной конференции "информационная безопасность регионов россии (ибрр-2017)" (Санкт-Петербург, 01–03 ноября 2017 г.). Санкт-Петербург, 2017, С. 520-522.
12. Билягдинов К.З., Красов А.В., Меняйло В.В., Исследование систем и анализ результатов испытаний // СПб: Астерион, 2019. 362 с.
13. Рыдзельева А.В., Ермолаев М.Б., Опыт оперативного прогнозирования цен на основе модели ARIMA // Проблемы экономики, финансов и управления производством. 2017. № 40. С. 93-95.
14. Штеренберг С.И., Москальчук А.И., Красов А.В. разработка сценариев безопасности для создания уязвимых виртуальных машин и изучения методов тестирования на проникновения // Информационные технологии и телекоммуникации. 2021. Т. 9. № 1. С. 47-58.
15. Проноза А.А., Чечулин А.А., Котенко И.В. Математические модели визуализации в siem-системах // Труды СПИИРАН. 2016. № 3 (46). С. 90-107.
16. Донсков Е.А., Ушаков И.А., Анализ защищенности виртуальных инфраструктур с использованием по vgate // Материалы VII Международной научно-технической и научно-методической конференции и «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании», (Санкт-Петербург, 28 февраля – 01 2018 года), С. 304-310.
17. Раднаев Б.Б., Цыбиков А.С., Хабитуев Б.В. ARIMA-модель пульсового сигнала // Вестник Бурятского государственного университета. Математика, информатика. 2017. № 1. С. 78-85.
18. Коломеев М.В., Котенко И.В., Косов Н.А., Агеев С.А., Иванов А.Ю., Анализ методов человеко-машинного взаимодействия в инструментах визуальной аналитики siem-систем. // Материалы 11-ой российской мультikonференции по проблемам управления «Информационные технологии в управлении» (Санкт-Петербург, 02–04 октября 2018 года) С. 559-562
19. 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.
20. Миняев А. А., Красов А. В., Сахаров Д. В. Метод и методика оценки эффективности системы защиты распределенных информационных систем // В сборнике: 2020 12-й Международный конгресс по ультрасовременным телекоммуникациям и системам управления и Семинары (ICUMT). 2020. С. 291-295.
21. Красов А.В., Штеренберг С.И., Голузина Д.Р., Методика визуализации больших данных в системах защиты информации для формирования отчетов уязвимостей // Электросвязь. 2019. № 11. С. 39-47.
22. Гельфанд А.М., Косов Н.А., Красов А.В., Орлов Г.А. Защита для распределенных отказов в обслуживании в облачных вычислениях // Материалы научных статей VIII Международной научно-технической и научно-методической конференции «актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» (Санкт-Петербург, 27–28 февраля 2019 года), С. 329-334.

## THEORETICAL ASSESSMENT OF MATHEMATICAL METHODS USAGE FOR PREDICTING VIRTUAL INFRASTRUCTURE LOAD

**SERGEY N. SHEMYAKIN**

St. Petersburg, Russia, s4421764@yandex.ru

**IGOR E. PESTOV**

St. Petersburg, Russia, Pestovie@outlook.com

**MAXIM V. ILIN**

St. Petersburg, Russia, forses3@mail.ru

**NIKITA A. RUDCHENKO**

St. Petersburg, Russia, rudebxy@yandex.ru

### ABSTRACT

**Introduction:** Nowadays virtualization is used everywhere, and it is especially necessary for creating the network and server infrastructure of the enterprise. Without mathematical forecasting, it is impossible to accurately predict the behavior of the infrastructure over a time period. Consequently, the task was set – to create the most accurate forecast for the longest possible period. **Methods:** To create the forecast, an Autoregressive Integrated Moving Average model based on time series was chosen. This model has several different modifications, such as a stately model, an extended model, a seasonal model. The description of the Autoregressive Integrated Moving Average mathematical models, as well as the extended model of the Autoregressive Integrated Moving Average and the seasonal model of the Autoregressive Integrated Moving Average, are considered. Based on the mathematical description, the forecasting methods were

studied and compared. Then the methods of mathematical forecasting were implemented in software, graphs were built, a comparison was made, and the best of them was identified to predict the behavior of the network infrastructure. The tests showed that the Autoregressive Integrated Moving Average model predicts the behavior of the network infrastructure for a week, the extended Autoregressive Integrated Moving Average model predicts the behavior of the network infrastructure for a month, and the seasonal Autoregressive Integrated Moving Average model predicts the behavior of the network infrastructure for a year. **Practical significance:** The results obtained based on the results of the Box-Jenkins mathematical forecasting modeling have wide practical application for monitoring a load of virtual infrastructure elements in order to prevent system failures and track anomalies, which increases the efficiency of resource use and infrastructure security.

### REFERENCES

1. Akimov Yu.A., Forecasting based on ARIMA models. *Integraciya nauki, obshchestva, proizvodstva i promyshlennosti* [Integration of science, society, production and industry]. 2018. P. 5-7. (In Rus)
2. Palij E.I., Hashkovskij V.V., application of ARIMA-model for forecasting. *Informacionnye tekhnologii, sistemnyj analiz i upravlenie* [Information technology, systems analysis and management] 2016. pp. 163-165.
3. Malygin A.A. Modeling of Dairy Cattle Breeding Indicators based on trend-seasonal model and arima-processes of box-jenkins. *Nauka o dannykh* [science about data], Moscow, 2020. P. 190-192. (in Rus)
4. Afanaseva T.V., Sapunkov A.A., Zavarzin D.V., Sibirev I.V., Morozov A.A. Forecasting service based on combining fuzzy time series models and ARIMA. *Rossiiskaia assotsiatsiia iskusstvennogo intellekta* [Russian association of artificial Intelligence], 2016. P. 229-236. (in Rus)
5. Gel'fand A.M., Lansere N.N., Lozhkina A.A., Fadeev I.I. Organization of a conceptual model of critical information infrastructure. *Metody i tehnicheckie sredstva obespechenija bezopasnosti informacii* [Methods and technical means of ensuring information security] 2020. № 29. P. 39-40. (In Rus)
6. Bagomedova A.R., Ushakov I.A., Cvetkov A.Ju. Razrabotka metodov proverki sootvetstviya serverov virtualizacii trebovanijam bezopasnosti v sootvetstvii s GOST R 56938-2016 [Development of methods for verifying the compliance of virtualization servers with security requirements in accordance with GOST R 56938-2016.]

Aktual'nye problemy infotelekkommunikacij v nauke i obrazovanii (APINO 2018). *VII Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja i nauchno-metodicheskaja konferencija*. [Actual problems of infotelecommunications in science and education (APINO 2018). VII International Scientific-technical and scientific-methodological Conference.] Collection of scientific articles. In 4 volumes. Edited by S. V. Bachevsky. 2018. P. 58-63. (In Rus)

7. Saharov D.V., Krasov A.V., Ushakov I.A., Orlov G.A., Secure software-defined network model in a KVM virtualization environment. *Jelektrosvjaz'* [Telecommunications] 2020. No 3. P. 26-32. (In Rus)

8. Gajfulina D.A., Kottenko I.V. Analysis of deep learning models for IoT network anomaly detection tasks. *Informacionno-upravljajushhie sistemy* [Information and control systems] 2021. No. 1 (110). P. 28-37. (In Rus)

9. Avdeeva M. L., Ushakov I. A., Filippov A. A. Sravnitel'nyj analiz koncepcii oblachnoj infrastruktury openstack i tradicionnoj arhitektury virtualizacii [Comparative analysis of the openstack cloud infrastructure concept and traditional virtualization architecture.] Aktual'nye problemy infotelekkommunikacij v nauke i obrazovanii (APINO 2020). *IX Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja i nauchno-metodicheskaja konferencija* [Actual problems of infotelecommunications in science and education (APINO 2020). THEIR International scientific-technical and scientific-methodological conference: collection of scientific articles. Saint-Petersburg] : Collection of scientific articles. St. Petersburg, 2020. P. 33-38. (In Rus)



10. Dubrovin N.D., Ushakov I.A., Chechulin A.A. Primenenie tehnologij bol'shikh dannyh v sistemah upravljenija informaciej i sobytijami bezopasnosti [Application of big data technology in information and security event management systems], *Materialy iz konferencii "Aktual'nye problemy infotelekkommunikacij v nauke i obrazovanii"* [Materials from the conference "Actual problems of infotelecommunications in science and education"] (In Rus)

11. Krasov A.V., Levin M.V., Fostach E.S., Problemy obespechenija bezopasnosti oblachnyh vychislenij [problems of ensuring the security of cloud computing], *Materialy X Cankt-Geterburgskoj mezhhregional'noj konferencii "informacionnaja bezopasnost' regionov Rossii"* [Materials of the X Zankt-Geterburg Interregional Conference "Information Security of Russian regions"] Saint Petersburg Pp. 2017. P. 520-522 (In Rus)

12. Biljatdinov K.Z., Krasov A.V., Menjajlo V.V. System research and test results analysis. SPb: Asterion [Saint Petersburg: Asterion], 2019. 362 p. (In Rus)

13. Rydzeleva A.V., Ermolaev M.B., Experience in operational price forecasting based on the ARIMA model. *Problemy jekonomiki, finansov i upravlenija proizvodstvom*. [Problems of economics, finance and production management.] Saint Petersburg, 2019. P. 329-334. (In Rus)

14. Shterenberg S.I., Moskal'chuk A.I., Krasov A.V. Develop security scenarios for creating vulnerable VMs and exploring penetration testing techniques. *Informacionnye tehnologii i telekkommunikacij* [Information technologies and telecommunications.] 2021. Vol. 9. No. 1. P. 47-58. (In Rus)

15. Pronoza A.A., Chechulin A.A., Kotenko I.V. Mathematical models of visualization in siem systems. *Trudy SPIIRAN*. [Works of SPIIRAN.] 2016. No3 (46), P. 90-107. (In Rus)

16. Donskov E.A., Ushakov I.A., Analiz bezopasnosti virtual'nyh infrastruktur s ispol'zovaniem programmnogo obespechenija vgate. [Analysis of the security of virtual infrastructures using vgate software.] *Aktual'nye problemy infotelekkommunikacij v nauke i obrazovanii* (apino 2018). *VII mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja i nauchno-metodicheskaja konferencija. sbornik nauchnyh statej. v 4-h tomah.*

*pod redakciej s.v. bachevskogo*. [Actual problems of infotelecommunications in science and education (apino 2018). VII international scientific-technical and scientific-methodological conference. collection of scientific articles. in 4 volumes. edited by S. v. Bachevsky.] 2018. P. 304-310. (In Rus)

17. Radnaev B.B., Tsybikov A.S., Khabituev B.V. ARIMA-model of the pulse signal. *Vestnik Buriatskogo gosudarstvennogo universiteta Matematika informatika* [Bulletin of the Buryat State University Mathematics Informatics] 2017. No. 1. P. 78-85. (In Rus)

18. Kolomeec M.V., Kotenko I.V., Kosov N.A., Ageev S.A., Ivanov A.Ju., Analysis of human-machine interaction methods in visual analytics tools for siem systems. *Informacionnye tehnologii v upravlenii* (ITU-2018). *ITU-2018. Conference materials*. 2018. P. 559-562. (In Rus)

19. Orlov G.A., Krasov A.V., Gel'fand A.M. Application of big data in the analysis of big data in computer networks. *H&ES Research*. 2020. Vol. 12. No. 4. P. 76-84. (In Rus)

20. Minjaev A. A., Krasov A. V., Saharov D. V. Method and methodology for evaluating the effectiveness of the distributed information system security system. *The 12th International Congress on Ultramodern Telecommunications and Control Systems and Seminars (ICUMT)*. 2020. P. 291-295 (In Rus)

21. Krasov A.V., Shterenberg S.I., Goluzina D.R. A technique for visualizing big data in information security systems for generating vulnerability reports. *Jelektrosvjaz'*. [Telecommunications]. 2019. No. 11. P. 39-47. (In Rus)

22. Gel'fand A.M., Kosov N.A., Krasov A.V., Orlov G.A. Zashhita ot raspredelenogo otkaza v obsluzhivanii v oblachnyh vychislenijah. [Protection for distributed denial of service in cloud computing.] *Aktual'nye problemy infotelekkommunikacij v nauke i obrazovanii (APINO 2019)*. *Sbornik nauchnyh statej VIII Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoi i nauchno-metodicheskoi konferencii*. [Actual problems of infotelecommunications in science and education (APINO 2019). collection of scientific articles of the VIII International Scientific-technical and scientific-methodological Conference] 2019. P. 329-334 (In Rus)

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS:

**Shemyakin S.N.**, Ph.D., Associate Professor of the The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications. St. Petersburg, Russia

**Pestov I.E.**, Senior Lecturer of the The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications.

**Ilin M.V.**, Student of the The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications.

**Rudchenko N.A.**, Student of the The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications.

---

**For citation:** Pestov I.E., Shemyakin S.N., Ilin M.V., Rudchenko N.A. Theoretical assessment of mathematical methods usage for predicting virtual infrastructure load. *H&ES Research*. 2021. Vol. 13. No. 4. Pp. 66-75. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-4-66-75 (In Russian)



---

# РОССИЙСКИЙ ФОРУМ МИКРОЭЛЕКТРОНИКА 2021

---



3-9 октября

Алушта, Республика Крым



7 дней

1000+ участников

11 научно-технических секций

Деловая программа

Демонстрационная зона



+7(495) 641-57-17

[www.microelectronica.pro](http://www.microelectronica.pro)

Email: [info@microelectronica.pro](mailto:info@microelectronica.pro)