

# SCCS



**Системы управления,  
связи и безопасности**

**Systems of Control,  
Communication and  
Security**

**№3 2017**

ISSN 2410-9916  
<http://sccs.intelgr.com>

## **«Системы управления, связи и безопасности»**

Периодическое электронное издание сетевого распространения.

Научный журнал.

№ 3. III квартал 2017 г.

---

**Учредитель журнала:** ООО «Корпорация «Интел Групп»

**Главный редактор:** С.И. Макаренко, кандидат технических наук, доцент.

**Редакционная коллегия:**

А.В. Баженов, кандидат технических наук, профессор; П.А. Будко, доктор технических наук, профессор; В.В. Борисов, доктор технических наук, профессор; Е.В. Гречишников, доктор технических наук, профессор; Ю.А. Кропотов, доктор технических наук, профессор; В.И. Левин, доктор технических наук, профессор; Г.И. Линец, доктор технических наук, доцент; А.С. Марков, доктор технических наук, старший научный сотрудник; Р.Л. Михайлов, кандидат технических наук; Е.А. Новиков, доктор технических наук, доцент; С.С. Семенов, доктор технических наук, доцент.

**Технический редактор:** В.М. Коровин.

**Ответственный секретарь:** Л.А. Макаренко.

**Адрес редакции и издателя журнала:**

197372, Санкт-Петербург, пр. Богатырский, д. 32, к. 1 лит. А, пом. 6Н.

Тел.: (812) 945-50-63. Сайт журнала: <http://sccs.intelgr.com>.

E-mail: [sccs@intelgr.com](mailto:sccs@intelgr.com)

Издается с апреля 2015 года. Выходит четыре раза в год.

Журнал зарегистрирован как сетевое издание в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (РОСКОМНАДЗОР), свидетельство о регистрации ЭЛ № ФС 77 - 61239 от 03.04.2015 г.

© ООО «Корпорация «Интел Групп», 2017

## «Systems of Control, Communication and Security»

Scientific electronic reviewed edition.

2017, No. 3.

---

**Founder of Journal:** Intel Group Corporation, ltd.

**Chief-in-Editor:** S. I. Makarenko, Ph.D. of Engineering Sciences, Docent.

**Editorial Board:**

A. V. Bazhenov, Ph.D. of Engineering Sciences. Full Professor;

V. V. Borisov, Dr. habil. of Engineering Sciences. Full Professor;

P. A. Budko, Dr. habil. of Engineering Sciences. Full Professor;

E. V. Grecihnikov, Dr. habil. of Engineering Sciences. Full Professor;

Y. A. Kropotov, Dr. habil. of Engineering Sciences. Full Professor;

V. I. Levin, Dr. habil. of Engineering Sciences. Professor. Ph.D., Full Professor;

G. I. Linec, Dr. habil. of Engineering Sciences. Docent;

A. S. Markov, Dr. habil. of Engineering Sciences. Docent;

R. L. Mikhailov, Ph.D. of Engineering Sciences;

E. A. Novikov, Dr. habil. of Engineering Sciences. Docent;

S. S. Semenov, Dr. habil. of Engineering Sciences. Docent.

**Technical editor:** V. M. Korovin.

**Responsible editorial secretary:** L. A. Makarenko.

**Editor and Publishing House Address:**

Bogatyirskiy pr, 32-1-A-6N, St. Petersburg 197372, Russia.

Phone: +7 812 945 50 63.

E-mail: [sccs@intelgr.com](mailto:sccs@intelgr.com)

Published since 2015. The Journal is published 4 times a year.

Licensed ЭЛ № ФС 77 - 61239 on 03.04.2015 issued by Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Media (RosKomNadzor) of Russia.

## Содержание

### **Смирнов С. В.**

Анализ исследований в области авиационной радиосвязи и обоснование перспективных путей совершенствования сетей радиосвязи управления авиацией с авиационного комплекса радиолокационного дозора и наведения ..... 1

### **Кузнецов В. А., Гончаров С. А.**

Структурно-параметрический синтез малогабаритной радиолокационной станции с синтезированной апертурой беспилотного летательного аппарата ближнего действия ..... 28

### **Бобков В. И., Борисов В. В., Дли М. И.**

Подход к исследованию теплопроводности нечеткими численными методами в условиях неопределенности теплофизических характеристик ..... 73

### **Левин В. И.**

Логические методы расчета надежности систем. Часть II.  
Математическая модель надежности ..... 84

### **Михайлов Р. Л.**

Анализ подходов к формализации показателя информационного превосходства на основе теории оценки и управления рисками ..... 98

### **Деев М. В., Кравец А. Г., Финогеев А. Г.**

Разработка информационной образовательной среды на базе конвергентного подхода ..... 119

### **Левин В. И.**

Динамические автоматы и их приложение для анализа сложных пространственных сцен ..... 135

## Table of contents

**S. V. Smirnov**

Analysis of Researches in Field of Aeronautical Telecommunication and  
Justification of New Ways of Improvement of Radio Network of AWACS ..... 1

**V. A. Kuznetsov, S. A. Goncharov**

Structural-Parametric Synthesis of Short-Range Unmanned Aerial Vehicle  
Small-Sized SAR..... 28

**V. I. Bobkov, V. V. Borisov, M. I. Dli**

Approach to a Heat Conductivity Research by Fuzzy Numerical Methods  
in the Conditions of Indeterminacy Thermal Characteristics ..... 73

**V. I. Levin**

Logical Methods of Computing of Systems Reliability. Part II.  
Mathematical Model of Reliability ..... 84

**R. L. Mikhailov**

Analysis of Approaches to the Formalization of the Indicator of  
Information Superiority Based on the Theory of Assessment and Risk  
Management ..... 98

**M. V. Deev, A. G. Kravets, A. G. Finogeev**

Development of an information educational environment based on a  
convergent approach ..... 119

**V. I. Levin**

Dynamic Automata and Analysis of Complex Spatial Scenes ..... 135

УДК 623.465

## Анализ исследований в области авиационной радиосвязи и обоснование перспективных путей совершенствования сетей радиосвязи управления авиацией с авиационного комплекса радиолокационного дозора и наведения

Смирнов С. В.

**Актуальность.** В настоящее время существует определенная вероятность применения Воздушно-космических сил России за пределами ее территории. Основной задачей при этом является организация управления авиацией при отсутствии наземных пунктов управления. В этом случае для управления авиацией используется воздушный пункт управления, который представляет собой авиационный комплекс радиолокационного дозора и наведения (АК РЛДН). Однако сети радиосвязи АК РЛДН имеют недостаточную пропускную способность при управлении большим числом воздушных судов. **Целью работы** является анализ исследований, связанных с развитием сетей авиационной радиосвязи, представленных в известных работах, и обоснование перспективных путей модернизации системы связи управления авиацией с АК РЛДН. **Результаты и их новизна.** Проведен анализ более ста источников, посвященных проблемам развития как гражданской, так и военной авиационной радиосвязи. В результате анализа было выявлено, что существующие способы повышения пропускной способности гражданских авиационных систем управления и связи применимы к сетям радиосвязи АК РЛДН в очень узком диапазоне. Это связано с дополнительными требованиями, которые предъявляются сетям радиосвязи управления военной авиации – устойчивостью и помехозащищенностью. Перспективным направлением совершенствования систем управления и связи АК РЛДН является применение Mesh-технологии, которая позволит организовать децентрализованную сеть обмена данными и обеспечить сетевое управление авиацией на театре военных действий. При этом необходимо учесть особое место АК РЛДН в организации единой сети обмена данными, а именно – его центральную и координирующую роль при организации связи и управлении сетевыми ресурсами. **Практическая значимость.** Представленный анализ будет полезен техническим и военным специалистам для обоснования новых способов совершенствования систем радиосвязи и управления как гражданской, так и военной авиацией. В особенности, полученные результаты анализа важны для обоснования новых технических решений по системам управления и связи в составе АК РЛДН.

**Ключевые слова:** система управления, авиация, система связи, командная радиоперехватная линия управления, авиационный комплекс радиолокационного дозора и наведения, сеть воздушной радиосвязи.

В настоящее время стремительно развиваются телекоммуникационные технологии и это технологическое развитие, а также внедрение новых концепций и сетевых технологий создает предпосылки для коренного изменения архитектуры и принципов построения сетей специального назначения. Эти новые концепции связаны с конвергенцией разнородных сетей связи, а также с рас-

### Библиографическая ссылка на статью:

Смирнов С. В. Анализ исследований в области авиационной радиосвязи и обоснование перспективных путей совершенствования сетей радиосвязи управления авиацией с авиационного комплекса радиолокационного дозора и наведения // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 3. С. 1-27. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-03/01-Smirnov.pdf>.

### Reference for citation:

Smirnov S. V. Analysis of Researches in Field of Aeronautical Telecommunication and Justification of New Ways of Improvement of Radio Network of AWACS. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 3, pp. 1-27. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-03/01-Smirnov.pdf> (in Russian).

ширением диапазона предоставляемых услуг связи. При этом отличительной особенностью сетей специального назначения является то, что с одной стороны они традиционно являются наиболее консервативным объектом в отрасли связи, а с другой стороны – они должны быть основаны на новейших достижениях этой отрасли, чтобы обеспечивать высокое качество обслуживания специальных абонентов.

Вопросам анализа функционирования сетей связи специального назначения посвящены работы: Г.И. Линца [1], С.И. Макаренко, В.Е. Федосеева [2], И.Н. Лялюка [3], А.В. Боговика, В.В. Игнатова [4], П.А. Будко [5], Е.Е. Исакова [6], Р.Л. Михайлова [7], С.М. Одоевского [9], А.А. Коробицина, А.М. Кудрявцева, А.А. Смирнова [10], А.Н. Буренина, К.Е. Легкова [11, 14], Ю.Н. Кобозева [12], В.Н. Шептуры [13], А.Н. Назарова, К.И. Сычева [37].

Достаточно полный перечень аппаратуры специальной связи и управления вооружением предоставлен в работах [15-17, 34]. При этом анализ проблем и перспектив развития систем специальной связи достаточно полно представлен в работах О.А. Коновалова [18] и С.И. Макаренко [19, 20].

Особенную роль среди систем специальной связи играют средства авиационной радиосвязи, предназначенные для управления военной авиацией. Развитие данных средств приобретает особую актуальность из-за повышения роли авиации для отстаивания интересов России на удаленных театрах военных действий (ТВД). Актуальность развития данного направления продемонстрировала операция Военно-космических сил России в Сирии. Особенностью применения авиации на удаленных театрах военных действий является отсутствие на них стационарного оборудования управления и связи. В таких условиях управление авиацией осуществляется с воздушного пункта управления – авиационного комплекса дозора и наведения (АК РЛДН).

Общим проблемам управления авиацией при решении задач нанесения ударов и отражения воздушного нападения посвящены работы научной школы академика РАН Е.А. Федосова [21, 27]. Вопросам управления авиации с АК РЛДН посвящена фундаментальная работа В.С. Вербы [22]. Основы организации радиоуправления летательными аппаратами (ЛА) посвящены работы научной школы В.Н. Меркулова [24, 35, 36]. При этом особенности управления беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) рассматриваются в работах К.Л. Войткевича, А.А. Сулимы, П.А. Зац [39], С.И. Макаренко [44], А.Р. Гайдука, С.Г. Капустина И.А. Каляева [45, 46], В.И. Меркулова и В.П. Харькова [47]. Как отмечается в данных работах современной тенденцией развития систем управления ЛА и БПЛА является их переход к сетевым принципам. Особенности реализации данного сетецентрического принципа управления силами и средствами представлены в работах В.С. Вербы, С.С. Поливанова [48], Е.А. Кондратьева [49, 50], С.И. Макаренко [51], А.Е. Богданова, С.А. Попова, М.С. Иванова [98]. При этом, как подчеркивается в работах В.С. Вербы [22, 52], для управления авиацией АК РЛДН имеет первостепенное значение. Именно АК РЛДН занимает место центрального элемента в сети управления самолетами фронтовой и истребительной авиации, выступая, с одной стороны, как организатор и координатор сетецентрического управле-

ния, а с другой стороны – как шлюз для сопряжения авиационных сетей с другими системами управления и связи на Земле, в море и в космосе.

Однако переход к сетевым принципам управления авиацией требует пересмотра принципов организации авиационной радиосвязи и информационного обеспечения. А именно – повышения пропускной способности, своевременности и устойчивости сетей воздушной радиосвязи (СВРС). Обеспечение повышения данных показателей СВРС, а также их адаптацию к сетевым принципам управления возможно за счет перехода к децентрализованному информационному обмену в СВРС. При этом предполагается, что АК РЛДН выступит центральным и координирующим элементом СВРС [22, 49, 52, 81].

Вопросам совершенствования СВРС управления военной и гражданской авиации посвящены работы: С.И. Макаренко [23, 28, 38, 43, 62-64, 82, 83, 91, 94, 95], М.С. Иванова [23, 92, 93, 97], С.А. Попова [23, 92, 93, 97], В.И. Меркулова [24-26, 35, 36], А.В. Комякова [29, 30], К.Л. Войткевича [30-33, 39, 54-57], А.А. Сулима [30, 39], Е.А. Белоусова [31, 32, 57], В.Ф. Брянцева [31, 32, 57], А.В. Кейстовича [31, 32, 84], Х.И. Сайфетдинова [31, 32, 57], С.В. Киткаева [53], С.В. Алехина [55], А.Н. Дмитриева [40, 41, 58-60], О.В. Мотина [40, 41, 61], А.В. Максимова [40, 41, 60], О.А. Блакитного [58], В.А. Гимбицкого [65-70], И.И. Сныткина [65, 66, 67], В.И. Калинина [71, 72, 73], С.Ю. Гоцуцова [74], Э.Ю. Калимулиной [75], А.Н. Морозова [76], А.В. Прохорова [77, 78, 79], Д.В. Колядова [77, 78], Д.С. Бондаря [79], А.С. Скороварова [80], С.Н. Назарова [85, 86, 88, 89], А.А. Шагаровой [88, 89], О.А. Шорина [87], А.В. Аганесова [90-95], А.Е. Богданова [97], М.С. Кулакова [100, 101], А.В. Абилова [102-104].

Общие принципы организации связи при УВД представлены в работах В.А. Силякова, В.Н. Красюка [105], Б.И. Кузьмина [106], В.К. Кульчицкого [107, 108].

В работах С.Ю. Гоцуцова [74], Э.Ю. Калимулиной [75], А.Н. Морозова [76], А.В. Прохорова [77, 78, 79], Д.В. Колядова [77, 78], Д.С. Бондаря [79], С.Н. Назарова [85, 86, 88, 89], А.А. Шагаровой [88, 89] и М.С. Кулакова [100, 101] рассматривались различные частные аспекты организации СВРС при организации управления воздушным движением (УВД) в гражданской авиации. В частности, в работах С.Ю. Гоцуцова [74], А.В. Прохорова [77, 78, 79], Д.В. Колядова [77, 78], Д.С. Бондаря [79], О.А. Шорина [87], рассмотрены различные вопросы построения систем управления УВД на основе СВРС с коммутацией пакетов и особенности организации маршрутизации трафика по этим сетям. В работе Э.Ю. Калимулиной [75] исследовались вопросы надежности СВРС территориально-распределенной системы УВД. В работе А.Н. Морозова [76] было проведено моделирование фиксированных сетей УВД и предложены частные способы их оптимизации. В работе О.А. Шорина [87] исследовались методы распределения частотно-временного ресурса в системах подвижной радиосвязи. В работах М.С. Кулакова [100, 101] рассматривались различные возможности по повышению пропускной способности современных сетей передачи данных для гражданской авиации. Отдельные вопросы организации децен-

трализованных сетей информационного обмена для группы гражданских БПЛА рассмотрены в работах А.В. Абилова [102-104].

При этом необходимо отметить, что результаты вышеуказанных работ, только в ограниченном варианте применимы к СВРС боевого управления авиацией. Для СВРС боевого управления свойственны такие специфичные особенности как: высокая интенсивность информационного обмена на конечных этапах полета и боевого применения, высокие требования по устойчивости и помехозащищенности связи к применению средств радиоэлектронного подавления (РЭП), высокая динамика изменения топологии сети, ограниченность стационарной наземной инфраструктуры связи на удаленных ТВД. Все эти особенности не учитываются в вышеуказанных работах, которые посвящены вопросам управления гражданской авиации.

Общие принципы организации связи при управлении боевой авиацией представлены в работах Е.А.Федосова [27], С. И. Макаренко, В.И. Сапожникова, Г.И. Захаренко, В.Е. Федосеева [28], В.Н. Меркулова [24-26, 35, 36], В.С. Вербы [25] А.В. Кейстовича, В.Р. Милова [87], В.М. Ланчева [109].

Вопросы маршрутизации информационных потоков и команд управления в СВРС управления именно военной авиации были рассмотрены в работе К.Л. Войткевича [54]. В этой работе описаны основные принципы маршрутизации трафика в СВРС, а также в наземных сетях при решении задач управления авиацией. Основные принципы организации связи СВРС представленные в работе К.Л. Войткевича [54] в дальнейшем получили развитие в работах: С.В. Алехина [55], А.А. Сулимы [30, 39], П.А. Зац [39], Е.А. Белоусова [31, 32, 57], В.Ф. Брянцева [31, 32, 57], А.В. Кейстовича [31, 32, 84], Х.И. Сайфетдинова [31, 32, 57]. В этих работах были описаны различные варианты совершенствования СВРС, в частности: конкретизированы подходы к маршрутизации сообщений в СВРС, представлены предложения по организации локальных СВРС гражданского и военного назначения, предложена концепция быстрой реконфигурации аппаратуры связи на основе концепции «программируемого радио».

В работах А.Н. Дмитриева, А.В. Максимова, О.А. Блакитного [58], В.А. Гимбицкого, И.И. Сныткина [65-70], В.И. Калинина [71-73], рассмотрены вопросы организации СВРС управления боевой авиацией в отдельном регионе или на ТВД при управлении массированными действиями разнородной авиационной группировки.

В работах А.Н. Дмитриева, А.В. Максимова, О.А. Блакитного [40, 41, 59, 61], С.И. Макаренко [59, 61], А.В. Кейстовича, В.Р. Милова [87] рассмотрены вопросы организации локальных СВРС объединяющих группы ЛА, а также исследованы вопросы эффективности различных алгоритмов доступа абонентов к радиоканалу связи.

В работах С.И. Макаренко [43, 62-64] рассмотрены вопросы эффективного управления ресурсами СВРС в интересах обеспечения высокой пропускной способности сети для организации высокоскоростного информационного обеспечения самолетов истребительной и фронтовой авиации.

В работах С.И. Макаренко [91, 94, 95], А.В. Аганесова [90-95], М.С. Иванова, С.А. Попова [92, 93, 97], А.Е. Богданова [97], рассмотрены во-

просы организации гибридных сетей управления авиации, вопросы маршрутизации информационных потоков в СВРС на основе децентрализованных и иерархических подходов.

В работах С.И. Макаренко [23, 28, 82, 83], М.С. Иванова, С.А. Попова [23, 97], А.С. Скороварова [80] рассмотрены вопросы обеспечения помехозащищенности СВРС управления авиацией от средств РЭП противника.

Вместе с тем, вышеуказанные работы не учитывают тенденции по внедрению сетевых систем управления авиацией, а также необходимости построения отдельных СВРС, а также единой СВРС на ТВД на основе разветвленной децентрализованной сетевой технологии. При этом основным центральным элементом такой СВРС должен являться АК РЛДН на который будут возложены функции координации и управления связью в единой СВРС на ТВД.

К отдельным работам, в которых рассматривается роль АК РЛДН при организации СВРС сетецентрического управления авиацией, можно отнести работы В.С. Вербы [22, 48, 52] и В.Н. Меркулова [24, 35, 36]. Однако технологические аспекты организации единой СВРС на ТВД для сетецентрического управления авиацией в данных работах представлены в недостаточной степени подробно.

В работах С.И. Макаренко [91, 94, 95], А.В. Аганесова [90-95], М.С. Иванова, С.А. Попова [92, 93, 97], А.Е. Богданова [97], К.Е. Легкова [99], М.С. Кулакова [100, 101], А.В. Абилова [102] показано, что перспективным направлением повышения пропускной способности СВРС может служить Mesh-технология, которая позволит организовать децентрализованную сеть обмена данными и за счет использования соединений со смежными сетями разгрузить основные иерархические направления связи в единой СВРС на ТВД. При этом необходимо учесть место АК РЛДН в организации единой СВРС на ТВД, его центральную и координирующую роль при организации сетецентрического управления авиацией. За основу разработки принципов построения единой СВРС на ТВД можно положить фундаментальные работы [42, 96], модели в которых необходимо усовершенствовать с учетом вышеуказанных перспектив развития систем управления авиацией.

### Вывод

Таким образом, проведенный анализ ранее опубликованных работ в предметной области систем авиационной радиосвязи позволил сформулировать противоречие в науке – между необходимостью обеспечения высокой пропускной способности единой СВРС на ТВД и невозможностью, на основе современного уровня развития научно-методического аппарата теории связи, обеспечить технологические решения для АК РЛДН по сетевому управлению военной авиацией на ТВД.

При разрешении этого противоречия и разработке перспективных технических решений по единой СВРС на ТВД необходимо учесть следующее:

- технической основой сетецентрического управления военной авиацией с АК РЛДН должна быть единая СВРС ТВД построенная на основе децентрализованного принципа информационного обмена;

- АК РЛДН в единой СВРС ТВД должен выполнять центральную и координирующую роль по организации связи и распределению ресурсов сети;
- реализация децентрализованного принципа информационного обмена в единой СВРС ТВД может быть основана на использовании Mesh-технологий.

### Литература

1. Линец Г. И. Системные аспекты теории синтеза и практика построения телекоммуникационных сетей. – Ставрополь: Альфа-Принт, 2010. – 460 с.
2. Макаренко С. И., Федосеев В. Е. Системы многоканальной связи. Вторичные сети и сети абонентского доступа: учебное пособие. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2014. – 179 с.
3. Лялюк И. Н. С4I: системы связи, АСУ и разведки вооруженных сил США. – М.: ВАТУ, 2000.
4. Боговик А. В., Игнатов В. В. Эффективность систем военной связи и методы ее оценки. – СПб.: ВАС, 2006. – 183 с.
5. Будко П. А., Рисман О. В. Многоуровневый синтез информационно-телекоммуникационных систем. Математические модели и методы оптимизации: Монография. – СПб.: ВАС, 2011. – 476 с.
6. Исаков Е. Е. Устойчивость военной связи в условиях информационного противоборства. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 400 с.
7. Михайлов Р. Л. Помехозащищенность транспортных сетей связи специального назначения. Монография. – Череповец: ЧВВИУРЭ, 2016. – 128 с.
8. Ермишян А. Г. Теоретические основы построения систем военной связи в объединениях и соединениях. Часть 1. – СПб.: ВАС, 2006. – 740 с.
9. Новые информационные и сетевые технологии в системах управления военного назначения. Учебник. Часть 1. Новые сетевые технологии в системах управления военного назначения / Под ред. С.М. Одоевского. – СПб.: ВАС, 2010. – 432 с.
10. Коробицин А. А., Кудрявцев А. М., Смирнов А. А. Информационные и сетевые технологии в автоматизированных системах специального назначения: учебное пособие. – СПб.: ВАС, 2015. – 132 с.
11. Буренин А. Н., Легков К. Е. Современные инфокоммуникационные системы и сети специального назначения. Основы построения управления. – М.: Медиа паблицер, 2015. – 348 с.
12. Кобозев Ю. Н. Перспективы развития систем связи и телекоммуникаций в информационно-управляющих системах специального назначения [Доклад] // Мат. Всероссийской научной конференции «Современные тенденции развития теории и практики управления в системах специального назначения». Том 4 «Телекоммуникации и связь в информационно-управляющих системах» / Под ред. Ю.В. Бородакия. – М.: ОАО «Концерн «Системпром», 2013. – С. 7-9.
13. Шептура В. Н. Архитектура перспективной системы связи группировки войск (сил) для обеспечения управления адаптивными действиями

войск (сил) [Доклад] // Мат. Всероссийской научной конференции «Современные тенденции развития теории и практики управления в системах специального назначения». Том 4 «Телекоммуникации и связь в информационно-управляющих системах» / Под ред. Ю.В. Бородакия. – М.: ОАО «Концерн «Системпром», 2013. – С. 16-20.

14. Легков К. Е., Ледянкин И. А. Основные подходы к предоставлению услуг в инфокоммуникационных системах специального назначения [Доклад] // Мат. Всероссийской научной конференции «Современные тенденции развития теории и практики управления в системах специального назначения». Том 4 «Телекоммуникации и связь в информационно-управляющих системах» / Под ред. Ю.В. Бородакия. – М.: ОАО «Концерн «Системпром», 2013. – С. 38-41.

15. Информационные технологии, связь и защита информации в МВД России - 2012 / По ред. М.Л. Тюркина, М.И. Шадаева, А.С. Аджемова, И.П. Иванова, С.В. Дворянкина, А.В. Куц, А.В. Квитко, П.А. Важева, Ю.А. Быстрова. – М.: ООО «Компания «Информационный мост», 2013. – 156 с. – URL: [www.informost.ru](http://www.informost.ru) (дата доступа 03.02.2017).

16. Связь в Вооруженных силах Российской Федерации – 2013: тематический сборник. / По ред. А.В. Абрамовича, А.В. Герасимова, С.В. Цибина, К.С. Ометова, Ю.А. Быстрова. – М.: ООО «Компания «Информационный мост», 2013. – 216 с. – URL: [www.informost.ru](http://www.informost.ru) (дата доступа 03.02.2017).

17. Оружие и технологии России. Энциклопедия. XXI век. Системы управления, связи и радиоэлектронной борьбы / Под общ. ред. С. Иванова. – М.: «Оружие и технологии», 2006. – 695 с.

18. Коновалов О. А., Буслаев А. И., Маликов С. В. Актуальные направления развития перспективной системы связи вооруженных сил // III научные чтения имени А.С. Попова. Современное состояние и перспективы развития систем связи и радиотехнического обеспечения в управлении авиацией: сб. ст. по материалам Всероссийской НТК слушателей, курсантов и молодых ученых, посвященной 95-летию со Дня образования войск связи (10 октября 2014 г.). – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2014. – С. 42-44.

19. Макаренко С. И. Перспективы и проблемные вопросы развития сетей связи специального назначения // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 2. С. 18-68. – URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-02/02-Makarenko.pdf> (дата обращения 6.11.2017).

20. Макаренко С. И. Описательная модель сети связи специального назначения // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 2. С. 113-164. – URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-02/05-Makarenko.pdf> (дата обращения 13.11.2017).

21. Антонов Д. А., Бабич Р. М., Балыко Ю. П., Белоглазов И. Н., Бернинский Е. Я., Борисов Л. В., Виноградов С. М., Войтенко В. И., Герасимов А. А., Гузеев Б. Н., Доценко А. В., Жеребин А. М., Зайцев А. В., Зинич В. С., Инсаров В. В., Кислицын В. А., Кичигин Г. Г., Колпаков К. М., Корниенко В. Н., Кравченко В. С., Кульчак М. Г., Махов Е. А.,

Немыченков И. В., Попов В. А., Пухов А. Л., Селезнев И. С., Сорокин Ю. Н., Топорков Н. В., Федосов Е. А., Червин В. И. Авиация ВВС России и научно-технический прогресс. Боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра / под ред. Е.А. Федосова. – М.: Дрофа, 2005. – 734 с.

22. Верба В. С. Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. Принципы построения, проблемы разработки и особенности функционирования. Монография. – М.: Радиотехника, 2014. – 528 с.

23. Макаренко С. И., Иванов М. С., Попов С. А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Монография. СПб.: – Свое издательство, 2013. – 166 с.

24. Меркулов В. И., Гандурин В. А., Дрогалин В. В. и др. Авиационные системы радиопреимущества: учебник для военных и гражданских ВУЗов. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 2008.

25. Верба В. С., Меркулов В. И. Теоретические и прикладные проблемы разработки систем радиопреимущества нового поколения // Радиотехника. 2014. № 5. С. 39-44.

26. Меркулов В. И. Научно-технические проблемы разработки авиационных систем радиопреимущества // Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского. 2015. № 3. С. 43-50.

27. Бабич В. К., Баханов Л. Е., Герасимов Г. П., Гиндранков В. В., Гришин В. К., Горощенко Л. Б., Зинич В. С., Карпеев В. И., Левитин В. Ф., Максимович В. А., Полушкин Ю. Ф., Слатин В. В., Федосов Е. А., Федун Б. Е., Широков Л. Е. Авиация ПВО России и научно-технический прогресс: боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра / под ред. Е.А. Федосова. Монография. – М.: Дрофа, 2004. — 816 с.

28. Макаренко С.И., Сапожников В.И., Захаренко Г.И., Федосеев В.Е. Системы связи: учебное пособие для студентов (курсантов) вузов. – Воронеж: ВАИУ, 2011. – 285 с.

29. Комяков А. В., Вдовин Л. М., Кондина И.В., Кулаков Д.С. Современная отечественная авиационная аппаратура автоматического обмена данными // Электросвязь. 2010. № 6. С. 32-37.

30. Комяков А. В., Войткевич К. Л., Сулима А. А. Инновационные решения для перспективных летательных аппаратов // Деловая слава России. 2013. № 3 (41). С. 26-27.

31. Белоусов Е. Л., Кейстович А. В., Войткевич К. Л., Брянцев В. Ф., Сайфетдинов Х. И. Современное оборудование сети авиационной электросвязи // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. 2012. № 1-2. С. 70-73.

32. Белоусов Е. Л., Брянцев В. Ф., Войткевич К. Л., Кейстович А. В., Сайфетдинов Х. И. Перспективное бортовое оборудование сети авиационной радиосвязи // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2012. № 3 (96). С. 11.

33. Войткевич К.Л. Опыт по созданию бортовых комплексов связи для самолетов тактического звена управления // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. – 2009. – № 1-2. – С. 42-43.

34. Научно-производственное предприятие «Полет». Официальный сайт. [Электронный ресурс]. 2017. – URL: <http://www.polyot.atnn.ru> (дата доступа 03.02.2017).

35. Меркулов В. Н., Дрогалин В. В., Канащенков А. Н., Лепин В. Н., Самарин О. Ф., Соловьев А. А. Авиационные системы радиоуправления. Том 1. Принципы построения систем радиоуправления. Основы синтеза и анализа / Под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. – М.: Радиотехника, 2003. – 192 с.

36. Меркулов В. И., Канащенков А. И., Чернов В. С., Дрогалин В. В., Антипов В. Н., Анцев Г. В., Кулабухов В. С., Лепин В. Н., Сарычев В. А., Саблин В. Н., Самарин О. Ф., Тупиков В. А., Турнецкий Л. С., Харьков В. П. Авиационные системы радиоуправления. Том 3. Системы командного радиоуправления. Автономные и комбинированные системы наведения / под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова – М.: Радиотехника, 2004. – 320 с.

37. Назаров А. Н., Сычев К. И. Модели и методы расчета показателей качества функционирования узлового оборудования и структурно-сетевых параметров сетей связи следующего поколения. – Красноярск: Изд-во ООО «Поликом», 2010. – 389 с.

38. Макаренко С. И., Бородинов Р. В. Анализ технологий обеспечения качества обслуживания в мультисервисных АТМ сетях // Информационные технологии моделирования и управления. 2012. №1 (73). С. 65-79.

39. Войткевич К. Л. Сулима А. А., Зац П. А. Проблемы построения канала управления беспилотными летательными аппаратами на основе ДКМВ-радиолинии // Электросвязь. 2014. № 7. С. 9-11.

40. Дмитриев А. Н., Максимов А. В., Мотин О. В. Оценка эффективности сетей воздушной радиосвязи при использовании различных алгоритмов многостанционного доступа // Тезисы докл. науч. техн. конференции. – Калуга: ФГУП «КНИИТМУ», 2002.

41. Дмитриев А. Н., Максимов А. В., Мотин О. В. Модели сетей радиосвязи, использующие различные алгоритмы множественного доступа // Тезисы докл. юбилейной науч. техн. конференции. – Калуга: ОАО «КНИИТМУ», 2002.

42. Клейнрок Л. Вычислительные сети с очередями. Пер с англ. / Л. Клейнрок. – М.: Мир. 1979. – 600 с.

43. Макаренко С. И. Адаптивное управление скоростями логических соединений в канале радиосвязи множественного доступа // Информационно-управляющие системы. 2008. № 6. С. 54-58.

44. Макаренко С. И. Робототехнические комплексы военного назначения – современное состояние и перспективы развития // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 2. С. 73-132. – URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2016-02/04-Makarenko.pdf> (дата обращения: 16.10.2017).

45. Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустин С. Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит. 2009. – 280 с.

46. Гайдук А. Р., Капустин С. Г. Концепция построения систем коллективного управления беспилотными летательными аппаратами // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. Т. 10. № 7. С. 8-16.

47. Меркулов В. И., Харьков В. П. Оптимизация иерархического управления группой БЛА // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. Т. 10. № 8. С. 61-67.

48. Верба В. С., Поливанов С. С. Организация информационного обмена в сетевых боевых операциях // Радиотехника. 2009. № 8. С. 57-62.

49. Кондратьев А. Е. Общая характеристика сетевых архитектур, применяемых при реализации перспективных сетевых концепций ведущих зарубежных стран // Военная мысль. – 2008. № 12. С. 63-74.

50. Кондратьев А. Е. Реализация концепции сетевых войн в ВВС США // Зарубежное военное обозрение. 2009. № 5. С. 44-49.

51. Макаренко С. И., Бережнов А. Н. Перспективы использования сетевых технологий управления боевыми действиями и проблемы их внедрения в вооруженных силах Российской Федерации // Вестник Академии военных наук. 2011. № 4 (37). С. 64-68.

52. Верба В. С. Авиационный комплекс радиолокационного дозора и наведения как элемент сетевой информационно-управляющей системы // Радиотехника. 2014. №5. С. 15-20.

53. Киткаев С. В. Концепция технической модернизации средств авиационной электросвязи России // Электросвязь. 2009. № 5. С. 29-33.

54. Войткевич К. Л. Методы управления трафиком в наземно-воздушных сетях связи. Дис. ... д.т.н. по спец. 05.13.01 / Войткевич Константин Леонидович. – Н.Новгород: НПП «Полет», 1998. – 375 с.

55. Алехин С. В., Войткевич К. Л. Моделирование протокола маршрутизации для беспроводных мобильных сетей // Электросвязь. 2014. № 7. С. 7-8.

56. Войткевич К. Л., Резвов А. В., Шанин В. Н. Специализированные локальные беспроводные мобильные сети гражданского и военного назначения // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. 2013. № 1-2. С. 130-133.

57. Белоусов Е. Л., Брянцев В. Ф., Войткевич К. Л., Кейстович А. В., Сайфетдинов Х. И. Вопросы создания авиационного радиосвязного оборудования по принципу «программируемое радио» // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2012. № 2 (95). С. 11-18.

58. Дмитриев А. Н., Максимов А. В., Блакитный О. А. Проблема построения единой автоматизированной системы радиосвязи региона и пути ее решения // Сборник трудов X юбилейной научно-технической конференции «Проблемы радиосвязи». – Н. Новгород: ГУП НПП «Полет», 1999.

59. Дмитриев А. Н., Мотин О. В. Модель авиационного УКВ канала обмена данными // Тезисы докладов научно-технической конференции. – Калуга: ФГУП «КНИИТМУ», 2002.

60. Дмитриев А. Н., Максимов А. В. Оптимизация авиационных сетей обмена данными // Сборник трудов X НТК «Проблемы радиосвязи». – Н.Новгород: ГУП НПП «Полет», 1999.

61. Мотин О. В. Модель функционирования авиационного УКВ канала обмена данными // XXIV военно-научная конференция молодых ученых. – Щелково: 30 ЦНИИ МО РФ, 2001.

62. Макаренко С.И. Особенности распределения ресурсов радио сети управления авиационными комплексами перехвата в условиях варьирования интенсивности информационного обмена // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «VIII научные чтения по авиации, посвященные памяти Н. Е. Жуковского». Часть 2. – М.: изд. ВВИА имени Н.Е. Жуковского, 2007. – С. 118.

63. Макаренко С. И. Задача адаптивного управления пропускной способностью каналов сети воздушной радиосвязи в условиях квазистационарности потоков данных // Сборник докладов юбилейной Всероссийской научно-технической школы-семинара «Проблемы совершенствования боевых авиационных комплексов, повышение эффективности их эксплуатации и ремонта». – Ставрополь: СВВАИУ, 2007. – С. 25-28.

64. Макаренко С. И. Расчет параметров алгоритма адаптивного распределения пропускной способности каналов наведения в сети воздушной радиосвязи // Сборник докладов юбилейной Всероссийской научно-технической школы-семинара «Проблемы совершенствования боевых авиационных комплексов, повышение эффективности их эксплуатации и ремонта». – Ставрополь: СВВАИУ, 2007. – С. 28-33.

65. Гимбицкий В. А., Сныткин И. И. Организация управления силами и средствами авиации региона // Вопросы тактики и оперативного искусства. Сборник научно-методических материалов кафедры № 100. – М.: ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского, 2003.

66. Гимбицкий В. А., Сныткин И. И. Задачи боевого управления единой системы воздушной радиосвязи в комплексе пунктов управления авиационной группировкой региона // Вопросы тактики и оперативного искусства. Сборник научно-методических материалов кафедры № 100. – М.: ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского, 2003.

67. Гимбицкий В. А., Сныткин И. И. Функциональная модель процесса управления авиации региона // Вопросы тактики и оперативного искусства. Сборник научно-методических материалов кафедры №100. – М.: ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского, 2003.

68. Гимбицкий В. А. Анализ системы воздушной радиосвязи в частях истребительной авиации // Тематический научно-технический сборник филиала ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского (г. Ставрополь). – 2005. – № 26.

69. Гимбицкий В. А., Бакум А. Н. Совершенствования боевого управления авиацией ПВО // Тезисы докладов 18 НТК курсантов СВВАИУ. – Ставрополь: СВВАИУ, 1996.

70. Гимбицкий В. А. Анализ системы воздушной радиосвязи в частях дальней авиации и ВТА // Тематический научно-технический сборник филиала ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского (г. Ставрополь). – 2005. – № 26.

71. Калинин В. И. Методика оценки вероятности обслуживания абонентов с требуемой достоверностью в зоне обслуживания станции радиодоступа [Доклад] // 66 НТК СБНТОРЭС имени А.С. Попова, посвященный Дню радио. 26 апреля 2011.

72. Калинин В. И. Пространственные модели зон обслуживания систем связи с подвижными объектами [Доклад] // 66 НТК СБНТОРЭС имени А.С. Попова, посвященный Дню радио. 26 апреля 2011.

73. Калинин В.И. Поточные сетевые модели в системах связи с подвижными объектами [Доклад] // 66 НТК СБНТОРЭС имени А.С. Попова, посвященный Дню радио. 26 апреля 2011.

74. Гоцуцов С. Ю. Совершенствование автоматизированных систем управления воздушным движением на основе технологий коммутации пакетов: дис. ... канд. техн. наук по спец. 05.22.13 / Гоцуцов Сергей Юрьевич. – М.: МИИГА, 2007. – 211 с.

75. Калимулина Э. Ю. Разработка и исследование аналитических моделей надёжности и их применение для оптимизации территориально-распределённых сетей: дис. ... канд. техн. наук по спец. 05.13.13 / Калимулина Эльмира Юрьевна. – М.: МГУСИ, 2009. – 222 с.

76. Морозов А. Н. Моделирование авиационных наземных фиксированных сетей передачи данных для организации воздушного движения в условиях дефицита исходных данных: дис. ... канд. физ.-мат. наук по спец. 05.13.18. / Морозов Александр Николаевич. – М.: МФТИ (ТУ), 2006. – 211 с.

77. Колядов Д. В., Прохоров А. В. Влияние явления одновременной передачи вызовов на работу систем управления воздушным движением // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2014. № 204. С. 82-87.

78. Колядов Д. В., Прохоров А. В. Реализация перспективной системы коммутации речевой связи для управления воздушным движением // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2013. – № 193. – С. 55-58.

79. Прохоров А. В., Бондарь Д. С. Применение аппаратуры широкополосного радиодоступа в локальных сетях связи и передачи данных систем управления воздушным движением // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2012. № 176. С. 93-100.

80. Скороваров А.С. Пути повышения эффективности функционирования авиационных средств обмена информацией с ППРЧ в условиях помех // Сборник трудов X НТК «Проблемы радиосвязи». – Н.Новгород: ГУП НПП «Полет», 1999.

81. Михайлов Р. Л. Анализ научно-методического аппарата теории координации и его использования в различных областях исследований // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 4. С. 1-29. – URL:

<http://sccs.intelgr.com/archive/2016-04/01-Mikhailov.pdf> (дата обращения 5.11.2017).

82. Макаренко С. И. Подавление пакетных радиосетей со случайным множественным доступом за счет дестабилизации их состояния / С.И. Макаренко // Журнал радиоэлектроники. 2011. № 9. С. 1-22. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep11/4/text.pdf> (дата доступа 03.02.2017).

83. Макаренко С. И. Оценка качества обслуживания пакетной радиосети в нестационарном режиме в условиях воздействия внешних дестабилизирующих факторов // Журнал радиоэлектроники. 2012. № 6. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun12/9/text.pdf> (дата доступа 03.02.2017).

84. Кейстович А. В., Милов В. Р. Виды радиодоступа в системах подвижной связи. – М.: Горячая линия-Телеком, 2015. – 278 с.

85. Назаров С. Н. Подход к решению задачи определения топологии сети радиосвязи декаметрового диапазона при ее интеграции в систему авиационной электросвязи // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2010. № 152. С. 36-39.

86. Назаров С. Н. Принципы реализации пространственного ресурса декаметровой радиосвязи в системе авиационной электросвязи при решении задач управления воздушным движением // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2010. № 152. С. 40-44.

87. Шорин О. А. Методы оптимального распределения частотно-временного ресурса в системах подвижной радиосвязи: дис. ... доктора техн. наук по спец. 05.12.13 / Шорин Олег Александрович. – М.: МТУСИ, 2005. – 351 с.

88. Назаров С. Н., Шагарова А. А. Анализ применения зон вынесенных ретрансляторов для беспроводной авиационной электросвязи // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2011. Т. 1. № 2. С. 213-214.

89. Назаров С. Н., Шагарова А. А. Совместное использование вынесенных зон ретрансляторов для обмена сообщениями с воздушными судами на различных авиатрассах // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2011. Т. 1. № 2. С. 215-217.

90. Аганесов А. В. Модель сети воздушной радиосвязи на основе протокола случайного множественного доступа CSMA/CA // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 1. С. 67-97. – URL: <http://journals.intelgr.com/sccs/archive/2015-01/06-Aganesov.pdf> (дата обращения: 16.10.2017).

91. Аганесов А. В., Макаренко С. И. Модель воздушно-космической сети связи с иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2015. № 4. С. 43-51.

92. Аганесов А. В., Иванов М. С., Попов С. А., Шунулин А. В. Повышение пропускной способности сети воздушно-космической радиосвязи за счет использования Mesh-технологий в системах межсетевых обмена // Теория и техника радиосвязи. 2016. № 2. С. 12-16.

93. Аганесов А. В., Иванов М. С., Попов С. А. Применение Mesh-технологий в системах межсетевых обмена с целью повышения пропускной способности каналов связи // Охрана, безопасность, связь. 2017. № 1-1. С. 196-203.

94. Аганесов А. В., Макаренко С. И. Модель объединенной воздушно-космической сети связи с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий // Инфокоммуникационные технологии. 2016. № 1. С. 7-16.

95. Аганесов А. В., Макаренко С. И. Балансировка информационной нагрузки между воздушным и космическим сегментами объединенной воздушно-космической сети связи построенной на основе Mesh-технологий // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2016. Том 7. № 1. С. 17-25.

96. Авен О. И., Гурин Н. Н., Коган Я. А. Оценка качества и оптимизация вычислительных систем. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1982.

97. Богданов А. Е., Попов С. А., Иванов М. С., Березин А. В. Компенсационные способы борьбы с прицельными по частоте помехами в системах авиационной радиосвязи, использующих псевдослучайную перестройку рабочей частоты // Радиотехника. 2013. № 8. С. 81-85.

98. Богданов А. Е., Попов С. А., Иванов М. С. Перспективы ведения боевых действий с использованием сетевых технологий // Военная мысль. 2014. № 3. С. 3-12.

99. Легков К. Е. Методы повышения производительности беспроводных mesh-сетей специального назначения // Т-Comm. 2011. № 3. С. 46-48.

100. Кулаков М. С. Анализ особенностей функционирования мобильных самоорганизующихся сетей MANET на уровне доступа к среде MAC // Т-Comm. 2014. № 10. С. 39-42.

101. Кулаков М. С. Применение алгоритмов самоорганизации для режима VDL-2 // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2012. Т. 5. № 5. С. 58-62.

102. Абилов А. В., Васильев Д. С. Повышение качества передачи потоковых данных в сетях БПЛА с помощью PULL-PUSH-подхода // Инфокоммуникационные технологии. 2014. Т. 12. № 4. С. 45-50.

103. Кайсина И. А., Васильев Д. С., Абилов А. В. Анализ эффективности протоколов маршрутизации OLSR и AODV в летающей сети FANET // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. 2017. Т. 20. № 1. С. 87-90.

104. Шамонов М. Ю., Абилов А. В. Мобильные самоорганизующиеся сети беспилотных летательных аппаратов FLYING AD HOC NETWORKS (FANETS) // Приборостроение в XXI веке - 2016. Интеграция науки, образования и производства Сборник материалов XII Международной научно-технической конференции. 2017. С. 542-550.

105. Силяков В. А., Красюк В. Н. Системы авиационной радиосвязи: Учебное пособие / Под ред. В.А. Силякова. – СПб.: ГУАП, 2004. – 160 с.

106. Кузьмин Б. И. Сети и системы авиационной цифровой электросвязи: учебное пособие. В 3-х частях. – СПб.: ОАО «НИИЭИР», 1999, 2000, 2003.

107. Кульчицкий В. К., Мешалов Р. О., Журавлев С. С. Системы, комплексы и средства авиационной электросвязи / Под ред. С.А. Кудрякова. – СПб.: Свое издательство, 2015.

108. Кудряков С. А., Кульчицкий В. К., Поваренкин Н. В., Пономарев В. В., Рубцов Е. А., Соболев Е. В., Сушкевич Б. А. Радиотехническое обеспечение полетов воздушных судов и авиационная электросвязь. Учебное пособие. – СПб.: Свое издательство, 2016.

109. Бреслер И. Б., Горбач А. Н., Ланчев В. М., Полушин К. В., Пшеницын А. А., Смирнова Е. В., Угловский Е. П. Средства связи противовоздушной обороны ВВС / Под ред. В.М. Ланчева. – Тверь: ВУ ПВО, 2003.

### References

1. Linets G. I. *Sistemnye aspekty teorii sinteza i praktika postroeniia telekommunikatsionnykh setei* [System aspects of the theory of fusion and practice the design of telecommunication networks]. Stavropol, Alfa-Print Publ., 2010. 460 p. (in Russian).

2. Makarenko S. I., Fedoseev V. E. Multichannel communication systems. Secondary networks and subscriber access networks. Tutorial. Saint-Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy Publ., 2014, 179 p. (in Russian).

3. Lialiuik I. N. *C4I: sistemy svyazi, ASU i razvedki vooruzhennykh sil SShA* [C4I: communications systems, automation and intelligence of the armed forces of the United States.]. Moscow, Military aviation technical University, 2000. (in Russian).

4. Bogovik A. V., Ignatov V. V. *Effektivnost' sistem voennoi svyazi i metody ee otsenki* [The effectiveness of military communications systems and assessment methods]. Saint-Petersburg, Military Communications Academy, 2006. 183 p. (in Russian).

5. Budko P. A., Risman O. V. *Mnogourovnevij sintez informacionno-telekommunikacionnykh sistem. Matematicheskie modeli i metody optimizatsii* [Multi-Level Synthesis of Information Telecommunication Systems. Mathematical Models and Methods of Optimization. Treatise]. Saint-Petersburg, Military Academy of the Signal Corps Publ., 2011. 476 p. (in Russian).

6. Isakov E. E. *Ustoichivost' voennoi svyazi v usloviakh informatsionnogo protivoborstva* [The stability of military communications in the conditions of information warfare]. Saint-Petersburg, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, 2009. 400 p. (in Russian).

7. Mikhailov R. L. *Pomekhozashchishchennost' transportnykh setei svyazi spetsial'nogo naznacheniiia. Monografiia* [Noise immunity of transport networks for special purposes. Monograph]. Cherepovets, The Cherepovets higher military engineering school of radio electronics, 2016. 128 p. (in Russian).

8. Ermishian A. G. *Teoreticheskie osnovy postroeniia sistem voennoi svyazi v ob"edineniakh i soedineniakh. Chast 1* [Theoretical basis for the development of

military communication systems in associations and connections. Part 1]. Saint-Petersburg, Military Academy of the Signal Corps Publ., 2006. 740 p. (in Russian).

9. Odoevskiy S. M. *Novye informatsionnye i setevye tekhnologii v sistemakh upravleniia voennogo naznacheniiia. Chast 1. Novye setevye tekhnologii v sistemakh upravleniia voennogo naznacheniiia* [New information and network technologies in control systems for military use. Part 1. New networking technologies in control systems for military use]. Saint-Petersburg, Military Academy of the Signal Corps Publ., 2010. 432 p. (in Russian).

10. Korobitsin A. A., Kudriavtsev A. M., Smirnov A. A. *Informatsionnye i setevye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh spetsial'nogo naznacheniiia* [Information and network technology in automated systems special purpose]. Saint-Petersburg, Military Academy of the Signal Corps Publ., 2015. 132 p. (in Russian).

11. Burenin A. N., Legkov K. E. *Sovremennye infokommunikatsionnye sistemy i seti spetsial'nogo naznacheniiia. Osnovy postroeniia upravleniia* [Modern infocommunication systems and networks for special purposes. Fundamentals of management]. Moscow, Media Publisher, 2015. 348 p. (in Russian).

12. Kobozev Iu. N. *Perspektivy razvitiia sistem sviazi i telekommunikatsii v informatsionno-upravliaiushchikh sistemakh spetsial'nogo naznacheniiia* [Prospects for the Development of Communication and Telecommunication Systems in Management Information Systems, Special Purpose]. *Vserossiiskaia nauchnaia konferentsiia «Sovremennye tendentsii razvitiia teorii i praktiki upravleniia v sistemakh spetsial'nogo naznacheniiia»* (Proceedings of All-Russian Scientific Conference "Telecommunications and Communication in Management Information Systems), vol. 4, Moscow, JSC "Concern "Sistemprom", 2013, pp. 7-9 (in Russian).

13. Sheptura V. N. *Arkhitektura perspektivnoi sistemy sviazi gruppirovki voisk (sil) dlia obespecheniia upravleniia adaptivnymi deistviiami voisk (sil)* [Architecture of Advanced Communication Systems Forces to Ensure Adaptive Management Actions of the Troops]. *Vserossiiskaia nauchnaia konferentsiia «Sovremennye tendentsii razvitiia teorii i praktiki upravleniia v sistemakh spetsial'nogo naznacheniiia»* (Proceedings of All-Russian Scientific Conference "Modern Trends in the Theory and Practice of Control Systems for Special Purposes"), vol. 4, Moscow, JSC "Concern "Sistemprom", 2013, pp. 16-20 (in Russian).

14. Legkov K. E., Lediankin I. A. *Osnovnye podkhody k predostavleniiu uslug v infokommunikatsionnykh sistemakh spetsial'nogo naznacheniiia* [Basic Approaches to the Provision of Services in Information and Communication Systems for Special Purposes]. *Vserossiiskaia nauchnaia konferentsiia «Sovremennye tendentsii razvitiia teorii i praktiki upravleniia v sistemakh spetsial'nogo naznacheniiia»* (Proceedings of All-Russian Scientific Conference "Telecommunications and Communication in Management Information Systems"), vol. 4, Moscow, JSC "Concern "Sistemprom", 2013, pp. 38-41 (in Russian).

15. Tiurkin M. L., Shadaev M. I., Adzhemov A. S., Ivanov I. P., Dvoriankin S. V., Kuts A. V., Kvitko A. V., Vazhev P. A., Bystrov Iu. A. *Informatsionnye tekhnologii, sviaz' i zashchita informatsii v MVD Rossii* [Information Technology, Communication and Information Protection in the Ministry of Internal

Affairs of Russia]. Moscow, "Company "Information Bridge", 2013, 156 p. Available at: [www.informost.ru](http://www.informost.ru) (accessed 03 February 2017) (In Russian).

16. Abramovich A. V., Gerasimov A. V., Tsibin S. V., Ometov K. S., Bystrov Iu. A. *Sviaz' v Vooruzhennykh silakh Rossiiskoi Federatsii - 2013: tematicheskii sbornik* [Communication in the Armed Forces of the Russian Federation - 2013: Thematic Collection]. Moscow, "Company "Information Bridge" Publ., 2013, 216 p. Available at: [www.informost.ru](http://www.informost.ru) (accessed 03 February 2017) (in Russian).

17. Ivanov S. *Oruzhie i tekhnologii Rossii. Entsiklopediia. XXI vek. Sistemy upravleniia, sviazi i radioelektronnoi bor'by* [Weapons and Technology of Russia. The Encyclopedia. XXI Century. Control Systems, Communications and Electronic Warfare]. Moscow, "Weapons and Technology" Publ., 2006, 695 p. (in Russian).

18. Konovalov O. A., Buslaev A. I., Malikov S. V. Aktual'nye napravleniia razvitiia perspektivnoi sistemy sviazi vooruzhennykh sil [Current Trends in the Development of Advanced Communication Systems of the Armed Forces]. *Proceedings of III readings behalf of the A. S. Popov, Voronezh, Military Training and Scientific Center of the Air Force "Air Force Academy Named after Professor N.E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin"*, 2014, pp. 42-44 (in Russian).

19. Makarenko S. I. Prospects and Problems of Development of Communication Networks of Special Purpose. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 2, pp. 18-68. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-02/02-Makarenko.pdf> (accessed 10 November 2017) (in Russian).

20. Makarenko S. I. Descriptive Model of a Special Purpose Communication Network. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 2, pp. 113-164. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-02/05-Makarenko.pdf> (accessed 13 November 2017) (in Russian).

21. Antonov D. A., Babich R. M., Balyko Iu. P., Beloglazov I. N., Berninskii E. Ia., Borisov L. V., Vinogradov S. M., Voitenko V. I., Gerasimov A. A., Guzeev B. N., Dotsenko A. V., Zherebin A. M., Zaitsev A. V., Zinich V. S., Insarov V. V., Kislitsyn V. A., Kichigin G. G., Kolpakov K. M., Kornienko V. N., Kravchenko V. S., Kul'chak M. G., Makhov E. A., Nemychenkov I. V., Popov V. A., Pukhov A. L., Seleznev I. S., Sorokin Iu. N., Toporkov N. V., Fedosov E. A., Chervin V. I. *Aviatsiia VVS Rossii i nauchno-tekhnicheskii progress. Boevye komplekсы i sistemy vchera, segodnia, zavtra* [Aviation of the Russian air force and scientific-technical progress. Combat systems and system yesterday, today, tomorrow]. Moscow, Drofa Publ., 2005. 734 p. (in Russian).

22. Verba V. S. *Aviatsionnye komplekсы radiolokatsionnogo dozora i navedeniia. Printsipy postroeniia, problemy razrabotki i osobennosti funkcionirovaniia. Monografiia* [Aircraft radar patrol and guidance. Principles, problems of development and peculiarities of functioning. Monograph]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2014. 528 p. (in Russian).

23. Makarenko S. I., Ivanov M. S., Popov S. A. *Pomekhozashchishchennost' sistem sviazi s psevdosluchainoi perestroikoi rabochei chastity. Monografiia*

[Interference Resistance Communication Systems with Frequency-Hopping Spread Spectrum. Treatise]. Saint-Petersburg, Svoe Izdatelstvo Publ., 2013, 166 p. (in Russian).

24. Merkulov V. I., Gandurin V. A., Drogalin V. V. and etc. *Aviatsionnye sistemy radioupravleniia* [Aircraft systems control]. Moscow, Air force engineering Academy named after Professor N.E. Zhukovskogo, 2008.

25. Verba V. S., Merkulov V. I. Heoretical and practical problems of designing next generation of radio guidance systems. *Radiotekhnika*, 2014, no. 5, pp. 39-44 (in Russian).

26. Merkulov V. I. Nauchno-tekhicheskie problemy razrabotki aviatsionnykh sistem radioupravleniia [Scientific-technical problems of development of aviation systems radio]. *Nauchnye chteniia po aviatsii, posviashchennye pamiati N.E. Zhukovskogo* [Scientific readings on aviation dedicated to the memory of N. E. Zhukovsky], 2015, no. 3, pp. 43-50 (in Russian).

27. Babich V. K., Bakhanov L. E., Gerasimov G. P., Gindrankov V. V., Grishin V. K., Goroshchenko L. B., Zinich V. S., Karpeev V. I., Levitin V. F., Maksimovich V. A., Polushkin Iu. F., Slatin V. V., Fedosov E. A., Fedunov B. E., Shirokov L. E. *Aviatsiia PVO Rossii i nauchno-tekhicheskii progress: boevye komplekсы i sistemy vchera, segodnia, zavtra* [Air defense of Russia and scientific-technical progress: combat systems and system yesterday, today, tomorrow]. Moscow, Drofa Publ., 2004. 816 p. (in Russian).

28. Makarenko S. I., Sapozhnikov V. I., Zakharenko G. I., Fedoseev V. E. *Sistemy sviazi* [Radio Communications System]. Voronezh, Military Aviation Engineering University, 2011. 285 p. (in Russian).

29. Komiakov A. V., Vdovin L. M., Kondina I. V., Kulakov D. S. *Sovremennaia otechestvennaia aviatsionnaia apparatura avtomaticheskogo obmena dannymi* [Modern Russian aviation equipment automatic data exchange]. *Elektrosviaz*, 2010, no. 6, pp. 32-37 (in Russian).

30. Komiakov A. V., Voitkevich K. L., Sulima A. A. *Innovatsionnye resheniia dlia perspektivnykh letatel'nykh apparatov* [Innovative solutions for advanced aircraft]. *Delovaia slava Rossii*, 2013, vol. 41, no. 3, pp. 26-27 (in Russian).

31. Belousov E. L., Keistovich A. V., Voitkevich K. L., Briantsev V. F., Saifetdinov Kh. I. *Sovremennoe oborudovanie seti aviatsionnoi elektrosviazi* [Modern equipment of the aeronautical telecommunication network]. *Sistemy i sredstva sviazi, teledeniia i radioveshchaniia*, 2012, no. 1-2, pp. 70-73 (in Russian).

32. Belousov E. L., Briantsev V. F., Voitkevich K. L., Keistovich A. V., Saifetdinov Kh. I. *Perspektivnoe bortovoe oborudovanie seti aviatsionnoi radiosviazi* [Perspective avionics network aeronautical telecommunication]. *Transactions of Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev*, 2012, vol. 96, no. 3, pp. 11 (in Russian).

33. Voitkevich K. L. *Opyt po sozdaniiu bortovykh kompleksov sviazi dlia samoletov takticheskogo zvena upravleniia* [Experience in creating on-Board communication systems for aircraft tactical control]. *Sistemy i sredstva sviazi, teledeniia i radioveshchaniia*, 2009, no. 1-2, pp. 42-43 (in Russian).

34. Scientific-production enterprise "Flight". Official on-line site. [On line resource]. 2017. Available at: <http://www.polyot.atnn.ru> (accessed 6 November 2017) (in Russian).

35. Merkulov V. N., Drogalin V. V., Kanashchenkov A. N., Lepin V. N., Samarin O. F., Solov'ev A. A. *Aviatsionnye sistemy radioupravleniia. Tom 1. Printsipy postroeniia sistem radioupravleniia. Osnovy sinteza i analiza* [Aviation radio system. Volume 1. Principles of systems radioupravlenie. Fundamentals of synthesis and analysis]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2003. 192 p. (in Russian).

36. Merkulov V. I., Konashenkov A. I., Chernov V. S., Dragalin V. V., Antipov V. N., Antsev G. V., Kulabukhov V. S., Lepin V. N., Sarychev V. A., Sablin V. N., Samarin O. F., Tupikov V. A., Turnetskii L. S., Khar'kov V. P. *Aviatsionnye sistemy radioupravleniia. Tom 3. Sistemy komandnogo radioupravleniia. Avtonomnye i kombinirovannye sistemy navedeniia* [Aviation radio system. Volume 3. Command radio control. Autonomous and combined guidance system]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2004. 320 p. (in Russian).

37. Nazarov A. N., Sychev K. I. *Modeli i metody rascheta pokazatelej kachestva funkcionirovaniia uzlovogo oborudovaniia i strukturno-setevykh parametrov setej svyazi sledujushhego pokoleniia* [The Models and the Methods of Measuring of Quality Indicators of Nodal Equipment Functioning and Network Structural Parameters of Next Generation Networks]. Krosnoyarsk, Polykom Publ., 2010. 389 p. (in Russian).

38. Makarenko S. I., Borodinov R. V. *Analiz tekhnologii obespecheniia kachestva obsluzhivaniia v mul'tiservisnykh ATM setiakh* [The Analysis of Technologies to Ensure Quality of Service in Multiservice ATM Networks], *Informatsionnye tekhnologii modelirovaniia i upravleniia*, 2012, vol. 73, no. 1, pp. 65-79 (in Russian).

39. Voitkevich K. L., Sulima A. A., Zats P. A. *Problemy postroeniia kanala upravleniia bespilotnymi letatel'nymi apparatami na osnove DKMV-radiolinii* [The problem of constructing a control channel of unmanned aerial vehicles based on dcmu-radio]. *Elektrosviaz*, 2014, no. 7, pp. 9-11 (in Russian).

40. Dmitriev A. N., Maksimov A. V., Motin O. V. *Otsenka effektivnosti setei vozdushnoi radiosviasi pri ispol'zovanii razlichnykh algoritmov mnogostantsionnogo dostupa* [Evaluation of the Effectiveness of the Networks to Air Radio Communications Using Different Algorithms for Multiple Access]. *Tezisy dokladov iubileinoi nauchno tekhnicheskoi konferentsii (Proceedings of the Conference)*, Kaluga, JSC «Kaluzhskii nauchno-issledovatel'skii institut telemekhanicheskikh ustroistv», 2002 (in Russian).

41. Dmitriev A. N., Maksimov A. V., Motin O. V. *Modeli setei radiosviasi, ispol'zuiushchie razlichnye algoritmy mnozhestvennogo dostupa* [Model Radio Communications Networks that use Different Algorithms for Multiple Access Telecommunications]. *Tezisy dokladov iubileinoi nauchno tekhnicheskoi konferentsii (Proceedings of the Conference)*, Kaluga, JSC «Kaluzhskii nauchno-issledovatel'skii institut telemekhanicheskikh ustroistv», 2002 (in Russian).

42. Kleinrock L. *Queueing Systems: Volume II – Computer Applications*. New York: Wiley Interscience. 576 p.

43. Makarenko S. I. Adaptivnoe upravlenie skorostiami logicheskikh soedinenii v kanale radiosviazi mnozhestvennogo dostupa [Adaptive Control Speed Logical Connections in the Radio Multiaccess Channel]. *Information and Control Systems*, 2008, no. 6, pp. 54-58 (in Russian).

44. Makarenko S. I. Military Robots – the Current State and Prospects of Improvement. *Systems of Control, Communication and Security*, 2016, no. 2, pp. 73-132. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2016-02/04-Makarenko.pdf> (accessed 16 October 2017) (in Russian).

45. Kalyayev I. A., Gaiduk A. R., Kapustin S. G. *Modeli i algoritmy kollektivnogo upravleniia v gruppakh robotov* [Models and algorithms of collective control in groups of robots]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 280 p. (in Russian).

46. Gaiduk A. R., Kapustyan S. G. Conceptual aspects of group application of unmanned aerial vehicles. *Journal Information-measuring and Control Systems*, 2012, vol. 10, no. 7, pp. 8-16 (in Russian).

47. Kharkov V. P., Merkulov V. I. Synthesis of an algorithm of hierarchical control of UAVs group. *Journal Information-measuring and Control Systems*, 2012, vol. 10, no. 8, pp. 61-67 (in Russian).

48. Verba V. S., Polivanov S. S. Organizatsiia informatsionnogo obmena v setetsentricheskikh boevykh operatsiiakh [Organization of information exchange in network-centric combat operations]. *Radiotekhnika*, 2009, no. 8, pp. 57-62 (in Russian).

49. Kondratev A. E. Obshchaia kharakteristika setevykh arkhitektur, primeniaemykh pri realizatsii perspektivnykh setetsentricheskikh kontseptsii vedushchikh zarubezhnykh stran [General characteristics of the network architectures used in the implementation of promising network-centric concepts of leading foreign countries]. *Military Thought*, 2008, no. 12, pp. 63-74 (in Russian).

50. Kondratev A. E. Realizatsiia kontseptsii setetsentricheskaia voina v VVS SShA [Implementation of the concept of network-centric warfare in the U.S. air force]. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie*, 2009, no. 5, pp. 44-49 (in Russian).

51. Makarenko S. I., Berezhnov A. N. Perspektivy ispol'zovaniia setetsentricheskikh tekhnologii upravleniia boevymi deistviiami i problemy ikh vnedreniia v vooruzhennykh silakh Rossiiskoi Federatsii [Prospects of using network-centric technologies for the management of the fighting and problems of their implementation in the armed forces of the Russian Federation]. *Vestnik Akademii voennykh nauk*, 2011, vol. 37, no. 4, pp. 64-68 (in Russian).

52. Verba V. S. Airborne warning and control systems as part of network-centric information management system. *Radiotekhnika*, 2014, no. 5, pp. 15-20 (in Russian).

53. Kitkaev S. V. Kontseptsiiia tekhnicheskoi modernizatsii sredstv aviatsionnoi elektrosviazi Rossii [The Concept of Technical Modernization of Aviation's Telecommunication Russia]. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2009, no. 5, pp. 29-33 (in Russian).

54. Voitkevich K. L. *Metody upravleniia trafikom v nazemno-vozdushnykh setiakh sviazi* [Methods of traffic management in ground-air communication

networks. Extended Abstract of Dr. habil. Thesis]. Nizhni Novgorod, Nauchno-proizvodstvennoe predpriatie "Polet", 1998, 375 p. (in Russian).

55. Alekhin S. V., Voitkevich K. L. Modelirovanie protokola marshrutizatsii dlia besprovodnykh mobil'nykh setei [Simulation of routing Protocol for wireless mobile networks]. *Elektrosviaz*, 2014, no. 7, pp. 7-8 (in Russian).

56. Voitkevich K. L., Rezvov A. V., Shanin V. N. Spetsializirovannye lokal'nye besprovodnye mobil'nye seti grazhdanskogo i voennogo naznacheniia [Specialized local mobile wireless network for civilian and military purposes] *Sistemy i sredstva sviazi, televideniia i radioveshchaniia*, 2013, no. 1-2, pp. 130-133 (in Russian).

57. Belousov E. L., Briantsev V. F., Voitkevich K. L., Keistovich A. V., Saifetdinov Kh. I. Issues of developing aviation radio communication equipment on "software-defined radio" principle. *Transactions of Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev*, 2012, vol. 95, no. 2, pp. 11-18

58. Dmitriev A. N., Maksimov A. V., Blakitnyi O. A. Problema postroeniia edinoi avtomatizirovannoi sistemy radiosviasi regiona i puti ee resheniia [The Problem of Constructing a Unified Automated Communication Systems of the Region and the Ways of its Solution]. Konferentsiia "Problemy radiosviasi" (Proceedings of the Conference "Problems of radio communication"). Nizhni Novgorod, Nauchno-proizvodstvennoe predpriatie «Polet», 1999 (in Russian).

59. Dmitriev A. N., Motin O. V. Model aviatsionnogo UKV kanala obmena dannymi [Model aviation ultrashort-waves communication channel]. *Tezisy dokladov nauchno tekhnicheskoi konferentsii* (Proceedings of the Conference), Kaluga, JSC "Kaluzhskii nauchno-issledovatel'skii institut telemekhanicheskikh ustroystv", 2002 (in Russian).

60. Dmitriev A. N., Maksimov A. V. Optimizatsiia aviatsionnykh setei obmena dannymi [Optimization of aviation networks data communication]. *Sbornik trudov X nauchno tekhnicheskoi konferentsii "Problemy radiosviasi"* (Proceedings of the Conference Title «Problems of radio communication»), Nizhni Novgorod, Nauchno-proizvodstvennoe predpriatie "Polet", 1999 (in Russian).

61. Motin O. V. Model' funktsionirovaniia aviatsionngo UKV kanala obmena dannymi [The Model of Functioning Aviation Ultrashort-waves Communication channel]. *XXIV voenno-nauchnaia konferentsiia molodykh uchennykh*. (Proceedings of the Conference Title XXIV military-scientific conference of young scientists), Shchyolkovo, 30 tsentral'nyi nauchno-issledovatel'skii institut Ministerstva oborony Rossiiskoi Federatsii, 2001 (in Russian).

62. Makarenko S. I. Osobennosti raspredeleniia resursov radio seti upravleniia aviatsionnymi kompleksami perekhvata v usloviakh var'irovaniia intensivnosti informatsionnogo obmena [Features of resource allocation radio network control aircraft interception complexes in terms of the variation of the intensity of data exchange]. *Materialy nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "VIII nauchnye chteniia po aviatsii, posviashchennye pamiati N.E. Zhukovskogo"* (Proceedings of the 8nd All-Russian Cientific Conference on Aviation, Dedicated to the Memory of N. E. Zhukovsky). Part 2, Moscow, Military Aviation Engineering Academia named N. E. Zhukovskogo Publ., 2007, 118 p. (in Russian).

63. Makarenko S. I. Zadacha adaptivnogo upravleniia propusknoi sposobnost'iu kanalov seti vozdushnoi radiosviasi v usloviakh kvazistatsionarnosti potokov dannykh [The task of the adaptive bandwidth control channel network air radio in conditions of quasi-stationarity of data streams]. *Sbornik dokladov konferentsii «Problemy sovershenstvovaniia boevykh aviatsionnykh kompleksov, povyshenie effektivnosti ikh ekspluatatsii i remonta»* (Proceedings of All-Russian Scientific and Technical Conference “Problems of improving combat airplane, increasing the efficiency of their operation and repair”), Stavropol, Stavropol Higher Military Aviation Engineering College, 2007, pp. 25-28 (in Russian).

64. Makarenko S. I. Raschet parametrov algoritma adaptivnogo raspredeleniia propusknoi sposobnosti kanalov navedeniia v seti vozdushnoi radiosviasi. [Calculation of parameters of the algorithm adaptive bandwidth channel capacity of guidance channel in the air network radio channel] *Sbornik dokladov iubileinoi Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi shkoly-seminara «Problemy sovershenstvovaniia boevykh aviatsionnykh kompleksov, povyshenie effektivnosti ikh ekspluatatsii i remonta»* (Proceedings of All-Russian Scientific and Technical Conference “Problems of Improving Combat Airplane, Increasing the Efficiency of Their Operation and Repair”), Stavropol, Stavropol Higher Military Aviation Engineering College, 2007, pp. 28-33 (in Russian).

65. Gimbitskii V. A., Snytkin I. I. Organizatsiia upravleniia silami i sredstvami aviatsii regiona [Organization Management of Forces and Means of Air in the Region]. *Voprosy taktiki i operativnogo iskusstva. Sbornik nauchno-metodicheskikh materialov kafedry №100*. Moscow, Military Aviation Engineering Academia named N. E. Zhukovskogo Publ., 2003 (in Russian).

66. Gimbitskii V. A., Snytkin I. I. Zadachi boevogo upravleniia edinoi sistemy vozdushnoi radiosviasi v komplekse punktov upravleniia aviatsionnoi gruppirovkoi regiona [The tasks of command and control of a unified system of air communication in the complex control of the aviation group of the region]. *Voprosy taktiki i operativnogo iskusstva. Sbornik nauchno-metodicheskikh materialov kafedry №100*. Moscow, Military Aviation Engineering Academia named N. E. Zhukovskogo Publ., 2003 (in Russian).

67. Gimbitskii V. A., Snytkin I. I. Funktsional'naia model' protsessa upravleniia aviatsii regiona [Functional model of the process control aviation in the region]. *Voprosy taktiki i operativnogo iskusstva. Sbornik nauchno-metodicheskikh materialov kafedry №100*. Moscow, Military Aviation Engineering Academia named N. E. Zhukovskogo Publ., 2003 (in Russian).

68. Gimbitskii V. A. Analiz sistemy vozdushnoi radiosviasi v chastiakh istrebitel'noi aviatsii [Analysis of the air communication system in parts of fighter aircraft]. *Tematicheskii nauchno-tekhnicheskii sbornik filiala VoЕННО-vozdushnai inzhenernai akademii imeni N. E. Zhukovskogo*, Stavropol, 2005, no. 26 (in Russian).

67. Gimbitskii V. A., Bakum A. N. Sovershenstvovaniia boevogo upravleniia aviatsiei PVO [Improvement of Command and Control Air Anti-Aircraft Defence]. *Abstracts of Papers 18 Scientific Technical Conference of Cadet of Stavropol Higher Military Aviation Engineering College*, Stavropol, Stavropol Higher Military Aviation Engineering College, 1996 (in Russian).

38. Gimbitskii V. A. Analiz sistemy vozdushnoi radiosviazi v chastiakh dal'nei aviatsii i VTA [Analysis of the air communication system in parts of long-range aviation and military transport aircraft]. Tematicheskii nauchno-tekhnicheskii sbornik filiala Voenno-vozdushnai inzhenernai akademii im. N.E. Zhukovskogo, Stavropol, 2005, no. 26 (in Russian).

71. Kalinin V. I. Metodika otsenki veroiatnosti obsluzhivaniia abonentov s trebuemoi dostovernost'iu v zone obsluzhivaniia stantsii radiodostupa [The method of estimating the probability of customer service with the required accuracy in the service area of the radio access station]. *66 nauch. konf SPbNTORES A.S Popova* (Abstracts of Paper 66 Scientific Technical Conference of St. Petersburg's Scientific-Technical Society of Radio Engineering, Electronics and Communication Named after A. S. Popov), 26 April 2011 (in Russian).

72. Kalinin V. I. Prostranstvennye modeli zon obsluzhivaniia sistem sviazi s podvizhnymi ob"ektami [Spatial models of service areas of communication systems with mobile objects]. *66 nauch. konf SPbNTORES A.S Popova* (Abstracts of Paper 66 Scientific Technical Conference of St. Petersburg's Scientific-Technical Society of Radio Engineering, Electronics and Communication Named after A. S. Popov), 26 April 2011 (in Russian).

73. Kalinin V. I. Potokovye setevye modeli v sistemakh sviazi s podvizhnymi ob"ektami [Streaming network models in communication systems with mobile objects]. *66 nauch. konf SPbNTORES A.S Popova* (Abstracts of Paper 66 Scientific Technical Conference of St. Petersburg's Scientific-Technical Society of Radio Engineering, Electronics and Communication Named after A. S. Popov), 26 April 2011 (in Russian).

74. Gotsutsov S. Iu. Sovershenstvovanie avtomatizirovannykh sistem upravleniia vozdushnym dvizheniem na osnove tekhnologii kommutatsii paketov. Diss. kand. tehn. nauk [Improvement of Automated Systems of Air Traffic Control Based on the Technology of Packet Switching. Ph.D. Tesis]. Moscow, Moscow State Technical University of Civil Aviation, 2007, 211 p. (in Russian).

75. Kalimulina E. Iu. *Razrabotka i issledovanie analiticheskikh modelei nadezhnosti i ikh primenenie dlia optimizatsii territorial'no-raspredeleennykh setei.* Diss. kand. tehn. nauk [Research and development of analytical reliability models and their application to optimization of geographically distributed networks. Ph.D. Tesis], Moscow, Moscow Technical University of Communications and Informatics, 2009, 222 p. (in Russian).

76. Morozov A. N. *Modelirovanie aviatsionnykh nazemnykh fiksirovannykh setei peredachi dannykh dlia organizatsii vozdushnogo dvizheniia v usloviakh defitsita iskhodnykh dannykh.* Diss. kand. fiz.-mat. nauk [Modeling aviation ground fixed data networks for air traffic management in conditions of deficiency of the original data. Ph.D. Tesis]. Moscow, Moscow Institute of Physics and Technology, 211 p. (in Russian).

77. Koliadov D. V., Prokhorov A. V. Vliianie iavleniia odnovremennoi peredachi vyzovov na rabotu sistem upravleniia vozdushnym dvizheniem [Effect of Simultaneous Transmissions Phenomenon on Air Traffic Control Systems

Functionality]. *Nauchnyi vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoi aviatsii*, 2014, no. 204, pp. 82-87 (in Russian).

78. Koliadov D. V., Prokhorov A. V. Realizatsiia perspektivnoi sistemy kommutatsii rechevoi sviazi dlia upravleniia vozdushnym dvizheniem [Implementation of Next-Generation Voice Communication System for Civil Aviation]. *Nauchnyi vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoi aviatsii*, 2013, no. 193, pp. 55-58 (in Russian).

79. Prokhorov A. V., Bondar' D. S. Primenenie apparatury shirokopolosnogo radiodostupa v lokal'nykh setiakh sviazi i peredachi dannykh sistem upravleniia vozdushnym dvizheniem [Application of Means of Broadband Radio Access in Local Communication Networks and Data Transmission for Systems of Air Traffic Management]. *Nauchnyi vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoi aviatsii*, 2012, no. 176, pp. 93-100 (in Russian).

80. Skorovarov A. S. Puti povysheniia effektivnosti funktsionirovaniia aviatsionnykh sredstv obmena informatsiei s PPRCh v usloviakh pomekh [Method of pseudorandom reorganization of working frequency]. *Sbornik trudov X Nauch.Tekhn. Konferentsii "Problemy radiosviasi"* (Proceedings of the Conference «Problems of Radio Communication»). Nizhni Novgorod, Nauchno-proizvodstvennoe predpriatie «Polet», 1999 (in Russian).

81. Mikhailov R. L. An Analysis of the Scientific and Methodological Apparatus of Coordination Theory And Its Use in Various Fields of Study. *Systems of Control, Communication and Security*, 2016, no. 4, pp. 1-29. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2016-04/01-Mikhailov.pdf> (accessed 5 November 2017) (in Russian).

82. Makarenko S. I. The Countermeasures of the Radio Networks with the Random Multiple Access by Changing the Radionet State to Non-Stable. *Radio electronics journal*, 2011, no. 9. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/sep11/4/text.pdf> (accessed 03 February 2017) (in Russian).

83. Makarenko S. I. Estimation of quality of service in radio network with package transmitting in unstationary mode under influence of external destructive factors. *Radio Electronics Journal*, 2012, no. 6. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/jun12/9/text.pdf> (accessed 03 February 2015) (in Russian).

84. Keistovich A. V., Milov V. R. *Vidy radiodostupa v sistemakh podvizhnoi sviasi* [The types of radio access in system of mobile communication]. Moscow, Goriachaia liniia-Telekom Publ., 2015. 278 p. (in Russian).

85. Nazarov S. N. Approach to the solution of the problem of determining the topology of the network of the radio communication of decametric range with its integration into the system of the aviation electrical communication. *Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*, 2010, no. 152, pp. 36-39 (in Russian).

86. Nazarov S. N. Principles of the realization of the three-dimensional resource of decametric radio communication in the system of aviation electrical communication with the solution of the problems of the air traffic control. *Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*, 2010, no. 152, pp. 40-44 (in Russian).

87. Shorin O. A. *Metody optimal'nogo raspredeleniia chastotno-vremennogo resursa v sistemakh podvizhnoi radiosviazi. diss. doktora tekhn. nauk* [Methods the Optimal Allocation of Time-Frequency Resource in Mobile Radio Systems. Dr. habil. thesis]. Moscow, Moscow Technical University of Communications and Informatics, 2005, 351 p. (in Russian).

88. Nazarov S. N., Shagarova A. A. The analysis of application of areas of the taken out repeaters for wireless aviation telecommunication. *Digital Signal Processing*, 2011, vol. 1, no. 2, pp. 213-214 (in Russian).

89. Nazarov S. N., Shagarova A. A. Sovmestnoe ispol'zovanie vynesennykh zon retransliatorov dlia obmena soobshcheniiami s vozdushnymi sudami na razlichnykh aviatrassakh [Sharing made areas of repeaters for communicating with the aircraft on various routes]. *Digital Signal Processing*, 2011, vol. 1, no. 2, pp. 215-217 (in Russian).

90. Aganesov A. V. Model of Radio Network with CSMA/CA Protocol. *Systems of Control, Communication and Security*, 2015, no. 1, pp. 67-97. Available at: <http://journals.intelgr.com/sccs/archive/2015-01/06-Aganesov.pdf> (accessed 16 October 2017) (in Russian).

91. Aganesov A. V., Makarenko S. I. Aerospace communications network model with traffic routing hierarchical principle. *Radio and telecommunication systems*, 2015, no. 4, pp. 43-51 (in Russian).

92. Aganesov A. V., Ivanov M. S., Popov S. A., Shunulin A. V. Increasing space-air communications system network bandwidth using Mesh technology in interworking systems. *Radio Communication Theory and Equipment*, 2016, no. 2, pp. 12-16 (in Russian).

93. Aganesov A. V., Ivanov M. S., Popov S. A. Application Mesh-технологий in systems of the gateway exchange for the purpose of increase of throughput of communication channels. *Okhrana, bezopasnost, sviaz*, 2017, no. 1-1. pp. 196-203 (in Russian).

94. Aganesov A. V., Makarenko S. I. Model of united air-space network with decentralized traffic routing based on Mesh technology. *Infocommunicacionnye tehnologii*, 2016, no. 1, pp. 7-16 (in Russian).

95. Aganesov A. V., Makarenko S. I. The traffic balancing method between aero and space segments in aerospace network based on Mesh-technology. *H&ES Research*, 2016, vol. 8, no. 1, pp. 17-25 (in Russian).

96. Aven O. I., Gurin N. N., Kogan Ia. A. *Otsenka kachestva i optimizatsiia vychislitel'nykh sistem* [Quality assessment and optimization of computing systems]. Moscow, Nauka Publ., 1982.

97. Bogdanov A. E., Popov S. A., Ivanov M. S., Berezin A. V. Compensatory ways of struggle against aim hindrances on frequency in systems of an aviation radio communication using pseudo-casual reorganisation of working frequency. *Radiotekhnika*, 2013, no. 8, pp. 81-85 (in Russian).

98. Bogdanov A. Ye., Popov S. A., Ivanov M. S. Prospects of warfare using network-centric technologies. *Military Thought*, 2014, no. 3, pp. 3-12 (in Russian).

99. Legkov K. E. Methods of increase productivity of wireless mesh-networks of a special purpose. *T-Comm*, 2011, no. 3, pp. 46-48 (in Russian).

100. Kulakov M. S. Analysis of functioning of mobile self-organizing networks MANET on the media access control layer MAC. *T-Comm*, 2014, no. 10, pp. 39-42 (in Russian).

101. Kulakov M. S. Primenenie algoritmov samoorganizatsii dlia rezhima VDL-2 [Application of algorithms of self-organization for VDL mode-2]. *Fundamentalnye problemy radioelektronnoy priborostroeniia*, 2012, vol. 5, no. 5, pp. 58-62 (in Russian).

102. Vasiliev D. S., Abilov A. V. Improving quality of video streaming in Fanets using pull-push approach. *Infokommunikatsionnye tehnologii*, 2014, vol. 12, no. 4, pp. 45-50 (in Russian).

103. Kaysina I. A., Vasiliev D. S., Abilov A. V. Analysis of Efficiency for AODV and OLSR Routing Protocols in Flying Ad Hoc Networks. *Bulletin of Kalashnikov ISTU*, 2017, vol. 20, no. 1, pp. 87-90 (in Russian).

104. Shamonov M. Iu., Abilov A. V. Mobil'nye samoorganizuiushchiesia seti bespilotnykh letatel'nykh apparatov FLYING AD HOC NETWORKS (FANETS) [Mobile ad-hoc network of unmanned aerial vehicles FLYING AD HOC NETWORKS (FANETS)]. *Priborostroenie v XXI veke - 2016. Integratsiia nauki, obrazovaniia i proizvodstva Sbornik materialov XII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* (Instrument-making in XXI century in 2016. Integration of science, education and production the Collection of materials of XII International scientific-technical conference), 2017, pp. 542-550 (in Russian).

105. Siliakov V. A., Krasiuk V. N. *Sistemy aviatsionnoi radiosviazi* [Aviation radio]. Saint-Petersburg, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 2004. 160 p. (in Russian).

106. Kuzmin B. I. *Seti i sistemy aviatsionnoi tsifrovoi elektrosviazi* [Network and system aviation digital telecommunications], In 3 volumes. Saint-Petersburg, Research institute of economy and information electronics, 1999, 2000, 2003.

107. Kul'chitskii V. K., Meshalov R. O., Zhuravlev S. S. *Sistemy, komplekсы i sredstva aviatsionnoi elektrosviazi* [Systems, complexes and means of aviation telecommunication]. Saint-Petersburg, Svoe izdatelstvo Publ., 2015.

108. Kudriakov S. A., Kul'chitskii V. K., Povarenkin N. V., Ponomarev V. V., Rubtsov E. A., Sobolev E. V., Sushkevich B. A. *Radiotekhnicheskoe obespechenie poletov vozdushnykh sudov i aviatsionnaia elektrosviaz'* [Radio-technical flight support of aircraft and aeronautical telecommunications]. Saint-Petersburg, Svoe izdatelstvo Publ., 2016.

109. Bresler I. B., Gorbach A. N., Lanchev V. M., Polushin K. V., Pshenitsyn A. A., Smirnova E. V., Uglovskii E. P. *Sredstva sviazi protivovozdushnoi oborony VVS* [Means of communication, air defense, air force]. Tver, Military Academy of aerospace defense named after Marshal of the Soviet Union G. K. Zhukov, 2003.

Статья поступила 13 ноября 2017 г.

### Информация об авторе

Смирнов Сергей Владимирович – соискатель ученой степени кандидата наук. Старший преподаватель кафедры эксплуатации бортового авиационного радиоэлектронного оборудования. ВУНЦ ВВС «ВВА имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж). Область научных интересов: маршрутизация трафика, воздушные сети радиосвязи, Mesh-технологии. E-mail: web-shark@mail.ru

Адрес: 394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54а.

---

## Analysis of Researches in Field of Aeronautical Telecommunication and Justification of New Ways of Improvement of Radio Network of AWACS

S. V. Smirnov

**Relevance.** At the present time, aerospace forces of Russia are applied outside of Russia. In this case, main of task is to control the aircrafts when ground control stations are not available. For this reason the airborne warning and control system (AWACS) is used as an air command post to control the aircrafts. However, the bandwidth of an existing radio networks is insufficient in the control of a large number of aircraft from AWACS. Thus, justification of new ways of improvement of the radio network of AWACS is topical theme of research. **The aim of paper** is study of research result in field of aviation communication and justification of new ways of improvement of the radio network of AWACS. **Results and their novelty.** The article made an analysis of more than a hundred sources which are studied improving a radio communications for both civilian and military aviation. The analysis show that existing ways of increasing performance of communication systems of civil aviation is difficult to apply to the radio network of AWACS for control of combat aircrafts. Perspective way of improvement of the communication system AWACS is using of Mesh-technology. This technology will allow organizing the decentralized radio network and providing a net-centric control of aircrafts from AWACS. In this case AWACS to be main element of the radio network of control of aircrafts and it to be coordinate and organize the network communication and distribution of the network resources. **Practical significance.** The presented analysis is useful technical and military experts to substantiate new ways of improving systems of control and communication both civilian and military aircraft. In particular, the analysis results are important for the justification of new technical solutions for radio network of control system of AWACS.

**Keywords:** control system, aviation, AWACS, communication system, radio network of control system of AWACS.

### Information about Author

Sergei Vladimirovich Smirnov – Doctoral Student. Senior Lecturer of Department of Exploitation of Aircraft Electronic Equipment. Military Training and Research Center of the Air Force “Military Air Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Ju. A. Gagarin”. Field of research: traffic routing, air communication networks, Mesh-networks. E-mail: web-shark@mail.ru

Address: Russia, 355000, Voronezh, Street of Old Bolsheviks, 54a.

УДК 005; 621.396.9

## Структурно-параметрический синтез малогабаритной радиолокационной станции с синтезированной апертурой беспилотного летательного аппарата ближнего действия

Кузнецов В. А., Гончаров С. А.

**Актуальность.** Одним из перспективных направлений развития беспилотной авиации является разработка беспилотных летательных аппаратов (БЛА) ближнего действия, используемые на больших и средних высотах при большой продолжительности полета. Размещаемые на таких БЛА сенсоры в сложных условиях съемки малоэффективны, что ведет к невозможности обеспечения непрерывности мониторинга. Для исключения зависимости от времени суток и погодных условий необходимо использовать радиолокационный модуль полезной нагрузки БЛА. Однако, в связи с жесткими ограничениями по массогабаритным характеристикам и энергопотреблению оборудования для БЛА, размещение существующих на сегодняшний день образцов радиолокационных станций с синтезированием апертуры (РСА) невозможно, что обуславливает актуальность данной работы. Поскольку разработка РСА носит междисциплинарный характер, единственным возможным способом решения задач такого класса является системный анализ. **Постановка задачи:** при проектировании универсального радиолокационного модуля для БЛА ближнего действия необходимо разработать такую схему построения РСА, которая обеспечит возможность ее технической реализации с минимальными массогабаритными характеристиками, при этом должна достигаться максимальная разрешающая способность. **Целью работы** является создание малогабаритного радиолокационного модуля для БЛА ближнего действия с эффективной вторичной обработкой траекторного сигнала в условиях высокой априорной неопределенности. **Используемые методы:** решение задачи разработки малогабаритной РСА основано на структурном синтезе схемы ее построения по мини-максному критерию «массогабаритные характеристики – разрешающая способность», при этом высокое разрешение радиолокационного изображения (РЛИ) достигается, в том числе, применением полученных в результате параметрического синтеза квазиоптимальных по критериям минимальной ошибки оценки фазы и минимальной энтропии изображения алгоритмов формирования и автофокусировки РЛИ. **Новизна:** элементами новизны в работе является оптимальная структура РСА, которая дополнительно включает в себя фильтр компенсации дальностей, контроллер управления и бортовую микро ЭВМ, позволяющие повысить отношение сигнал/шум отраженного от целей на больших дальностях сигнала, повысить стабильность модуляции частоты зондирующего сигнала при нерегулярных искажениях модуляционной характеристики формирователя ЛЧМ сигнала вследствие изменения диапазона рабочих температуры и напряжения, а также формировать РЛИ высокого разрешения непосредственно на борту БЛА и удаленно управлять режимами работы РСА. **Результат.** Использование синтезированных на основе системного подхода и представленных структуры малогабаритной РСА и квазиоптимальных алгоритмов формирования и автофокусировки РЛИ позволяет реализовать универсальный радиолокационный модуль на БЛА ближнего действия с массой полезной нагрузки до 5 кг с обработкой траекторного сигнала непосредственно на борту, что существенно сокращает стоимость аппаратуры потребителей. Предлагаемая структурная схема РСА реализована в виде цифровой и радиочастотной плат. Радиочастотная часть осуществляет передачу зондирующего сигнала в полосе рабочих частот 5100–6000 МГц, прием и первичную обработку траекторного сигнала. Цифровая часть предназначена для формирования питающих

### Библиографическая ссылка на статью:

Кузнецов В. А., Гончаров С. А. Структурно-параметрический синтез малогабаритной радиолокационной станции с синтезированной апертурой беспилотного летательного аппарата ближнего действия // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 3. С. 28-72. URL: <http://scs.intelgr.com/archive/2017-03/02-Kuznetsov.pdf>

### Reference for citation:

Kuznetsov V. A., Goncharov S. A. Structural-parametric synthesis of short-range unmanned aerial vehicle small-sized SAR. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 3, pp. 28-72. Available at: <http://scs.intelgr.com/archive/2017-03/02-Kuznetsov.pdf> (in Russian).

напряжений и управления элементами структурной схемы. В бортовой микро ЭВМ осуществляется вторичная обработка принятого сигнала, в том числе формирование и автофокусировка РЛИ решением до 0,19 м. **Практическая значимость.** Комплекс представленных решений предлагается реализовать в виде универсального радиолокационного модуля БЛА ближнего действия, позволяющего обеспечить реальную непрерывность мониторинга и, в конечном счете, занять преимущественные позиции на мировом рынке дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в сегменте радиолокационных данных, полученных с помощью БЛА типа HALE/MALE.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование Земли, системный анализ, радиолокационная станция с синтезированной апертурой антенны, линейно частотно-модулированный сигнал, радиолокационное изображение, автофокусировка, беспилотный летательный аппарат.

## Введение

В течение последнего десятилетия разработка и производство беспилотных летательных аппаратов (БЛА) являются наиболее динамичным сегментом мировой авиационной отрасли и стабильно обеспечивают совокупный среднегодовой темп роста не менее 10%. Даже в периоды общего спада отрасли сегмент БЛА демонстрирует положительную динамику. В настоящее время основные объемы этого рынка обеспечиваются потребителями из силового сектора, решающими задачи военных и специальных применений, охраны границ и общественного порядка. Однако рынок гражданских и коммерческих применений имеет наибольший потенциал роста и, как ожидается, уже к 2020 году обгонит по объему рынок обеспечения безопасности.

В существующих условиях Россия занимает менее 1% мирового рынка в сегменте «Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) и мониторинг» и, без заметной государственной поддержки, может не сохранить свои позиции к 2035 году [1]. Для дальнейшего усиления позиций России, в условиях быстрых технологических изменений и высокой конкуренции на международных рынках, требуется реализация мер по развитию БЛА, новых типов полезной нагрузки, комплексных решений и услуг на их основе.

По сравнению с пилотируемыми воздушными судами, БЛА обладают следующими преимуществами:

- БЛА можно применять на сверхмалых высотах, что позволяет получить недостижимую для пилотируемых аппаратов геодезическую точность (до 2–3 см против 15–20 см);
- в силу значительно меньшего веса самого БЛА для съемки требуется намного меньше энергии и, соответственно, затрат;
- БЛА можно доставить к месту выполнения работ дешевыми наземными видами транспорта или регулярным авиарейсом, пилотируемый аппарат доставить к месту работ намного дороже;
- БЛА эффективнее при съемке линейных объектов (тяжелому пилотируемому летательному аппарату трудно выдерживать строгую линейность этого объекта) и при съемке небольших объектов;
- БЛА может обеспечить значительно большую точность прохождения заданного маршрута вследствие меньшей массы и автоматического управления;

- беспилотным аппаратом может владеть непосредственно потребитель данных, нет необходимости заказывать съемку и дожидаться выполнения работ;
- БЛА может летать на сверхмалых высотах практически в любую погоду, над облаками.

Исходя из решаемых с помощью БЛА задач, одним из возможных путей расширения этого сегмента рынка является создание радиолокационных сенсоров для комплексов с БЛА ближнего действия с максимальной массой полезной нагрузки до 5 кг, позволяющих получать принципиально новые характеристики земной (водной) поверхности и объектов, а также программно-алгоритмического обеспечения тематической обработки (дешифрирования) радиолокационных изображений (РЛИ). К таким сенсорам можно отнести многодиапазонные, поляриметрические радиолокационные станции с синтезированной апертурой антенны (РСА) с возможностью интерференционной обработки сигналов и ММО (Multiple In Multiple Out) радиолокаторы.

Основными научно-техническими проблемами, связанными с внедрением перспективных РСА на БЛА ближнего действия, являются снижение массогабаритных характеристик и энергопотребления радиолокатора, обеспечение коррекции нестабильной траектории полета БЛА. Решение задачи такого класса сводится к синтезу оптимальной (рациональной) структуры малогабаритной РСА без промежуточных преобразований частоты с использованием линейно частотно-модулированных (ЛЧМ) сигналов. Реализация подобных схем возможна на основе многослойных печатных плат, высокоинтегрированной компоновки радиоэлектронных элементов, применения микрополосковых (печатных) антенн и быстродействующих процессоров для синтеза и автофокусировки РЛИ непосредственно на борту БЛА. Это позволит значительно снизить массу и габариты РСА, существенно уменьшить энергопотребление (повысить энергоэффективность) радиолокатора и создать унифицированный радиоэлектронный модуль полезной нагрузки для БЛА ближнего действия.

Цель статьи – создание малогабаритного радиолокационного модуля для БЛА ближнего действия с эффективной вторичной обработкой траекторного сигнала в условиях высокой априорной неопределенности.

### **Анализ рынка данных дистанционного зондирования Земли**

Для достижения поставленной цели, согласно известных методик классического системного подхода к синтезу сложных технических систем [2], помимо определения конечного результата, необходимо рассмотреть роль, место и перспективы как радиолокационных данных дистанционного зондирования Земли, так и малогабаритных РСА для БЛА. В [3] подробно рассмотрены результаты анализа рынков ДЗЗ и БЛА. В рамках данной статьи следует обратить внимание на основные выводы, касающиеся БЛА ближнего действия и радиолокационных данных ДЗЗ, полученных с их помощью.

Оценка мирового рынка ДЗЗ неоднозначна, поскольку индустрия ДЗЗ в большинстве случаев завязана на государственное финансирование в рамках гражданских программ и финансирование из оборонных бюджетов, которые

обычно закрыты для публикации уже на уровне планов и проектов. Тем более это относится и к России – нормативные положения, устанавливающие правила распространения пространственных данных, формируются госструктурами и определяют темпы и объем этого рынка. Сервисы ДЗЗ следует классифицировать по типам используемых для получения информации носителей – космические, авиационные, наземные и другие (рис. 1), при этом космическая технология ДЗЗ является наиболее востребованной – сегодня и в ближайшей перспективе объемы сервисов ДЗЗ из космоса на рынке геопространственной информации устойчиво оценивались в 43%.

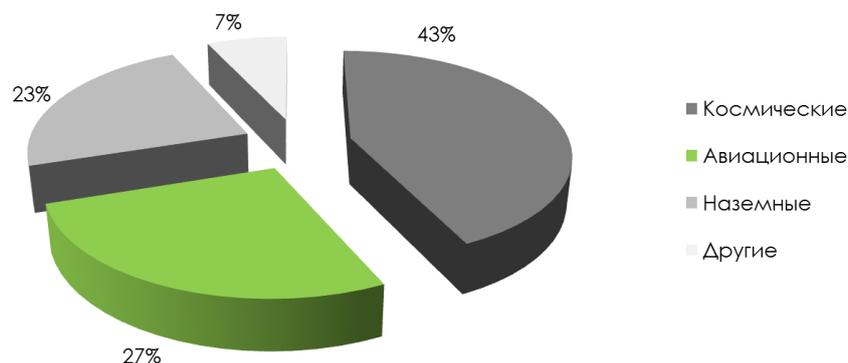


Рис. 1. Распределение рынка сервисов ДЗЗ между конкурирующими технологиями в 2011–2016 гг.

К сожалению, в России индустрия ДЗЗ развивается без учета общемировых тенденций, а решения о проектируемых системах ДЗЗ принимаются без внешней независимой экспертизы. Положительные сдвиги в приближении российской нормативно-правой базы в области ДЗЗ начали просматриваться в конце 2014 году, но действительно ли они приведут к расширению российского рынка ДЗЗ и тем более российской составляющей на мировом рынке ДЗЗ, пока уверенности нет, в том числе и по причине неоднозначности ряда нормативных положений [4].

Появление на рынке ДЗЗ снимков высокого разрешения (менее 1 м для черно-белых и 2,5 м для многоспектральных) с коммерческих спутников открыло новые горизонты использования данных ДЗЗ и способствовало разработке новых методов подготовки продуктов по требованиям заказчика. В ответ на этот вызов в области аэросъемки были разработаны новые технологии получения пространственных данных в цифровом виде. По ранним оценкам некоторых аналитиков рынка [5] предполагалось, что космические снимки серьезно потеснят авиационные. По современным данным, оба эти рыночных сегмента продолжают свой рост и успешно дополняют друг друга (рис. 2).

В ряде случаев поставщики данных космической и авиационной съемки создали стратегические коалиции для расширения бизнеса каждого из них. В рамках данной работы выявлены вполне достаточные потенциальные возможности для роста рынка данных ДЗЗ в различных его сегментах. Несмотря на то, что в настоящее время приложения в области цифровой картографии, систем

электронной администрации, а также для целей национальной обороны и защиты пространственных данных являются доминирующими на рынке ДЗЗ, все больше ощущаются потребности в разработке геоинформационных систем для органов местного самоуправления, полиции, служб чрезвычайных ситуаций, экологического контроля и т. п.



Рис. 2. Динамика роста продаж материалов авиационной и космической съемки

В сегменте авиационных систем ДЗЗ переход к технологиям, использующим данные, полученные с помощью обладающих возможностями непосредственной географической привязки и получения альтиметрической информации сенсоров, открыла новые рынки для составления крупномасштабных планов городов и анализа инфраструктур. Особенно бурное развитие в разработке таких сенсоров и технологий их использования происходит последние 20 лет [6]. Цифровые аэросъемочные камеры в сочетании с бортовыми инерциальными и GPS системами представляют собой достаточно экономичное решение для сбора географически привязанной информации, использование которой способно открыть новые рынки, особенно в случаях, когда стоимость данных ДЗЗ является решающим фактором (рис. 3).

В настоящее время пользователи данных ДЗЗ рассматривают возможность перехода от использования цифровых цветных и монохромных снимков к применению мультиспектральных, гиперспектральных и многочастотных радиолокационных данных, поэтому ожидается повышение спроса на них, особенно с учетом того, что сенсорные технологии развиваются очень динамично и обеспечивают все более низкую стоимость работ при более обширном покрытии и повышении точности. Из всего состава радиолокационных средств ДЗЗ к системам авиационного базирования относят лишь 23%, из них размещаемых на БЛА лишь 7%, так как основными носителями РСА являются космические аппараты, затем самолеты и вертолеты. Среди радиолокационных средств ДЗЗ выделяют одночастотные РСА (10% – в основном, на авиационных носителях), многодиапазонные РСА (50% – в большей степени это космические системы), поляриметрические РСА (5%), инверсные РСА (5%) и многопозиционные РСА (30%). При этом следует учитывать, что современные космические РСА являются многомерными – то есть объединяющими все типы приведенных радиолока-

торов, из чего можно сделать вывод о перспективности развития многодиапазонных и поляриметрических РСА с интерференционной обработкой траекторных сигналов (рис. 4).

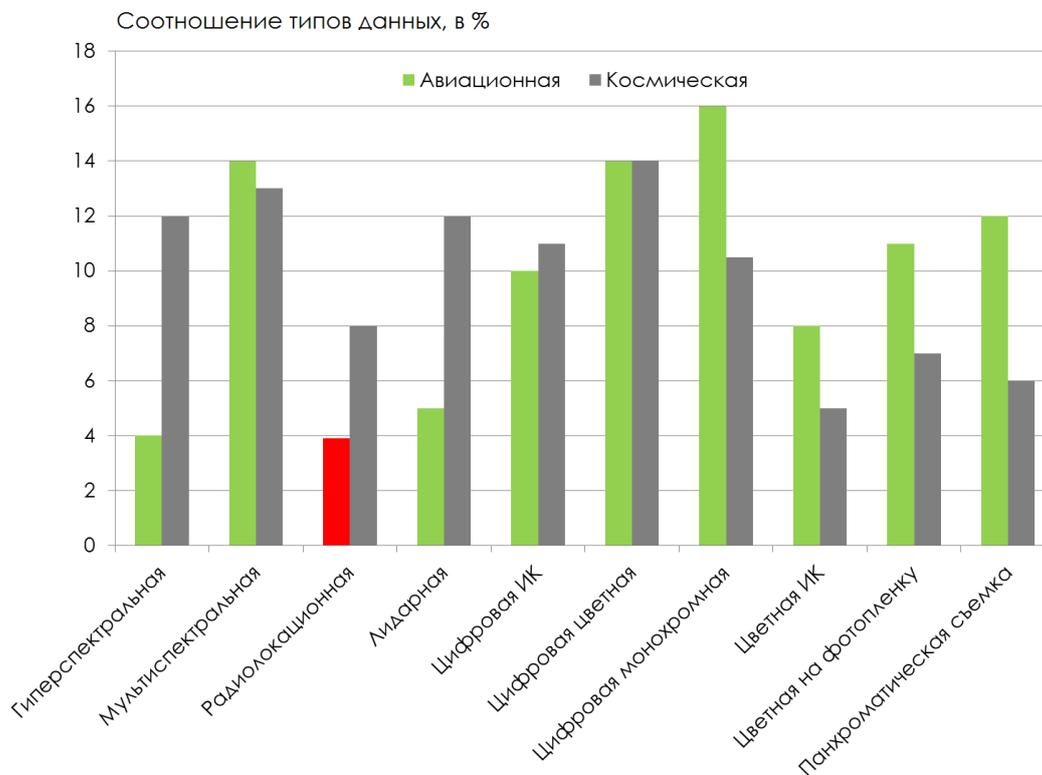


Рис. 3. Оценка спроса на различные типы данных авиационной и космической съемки

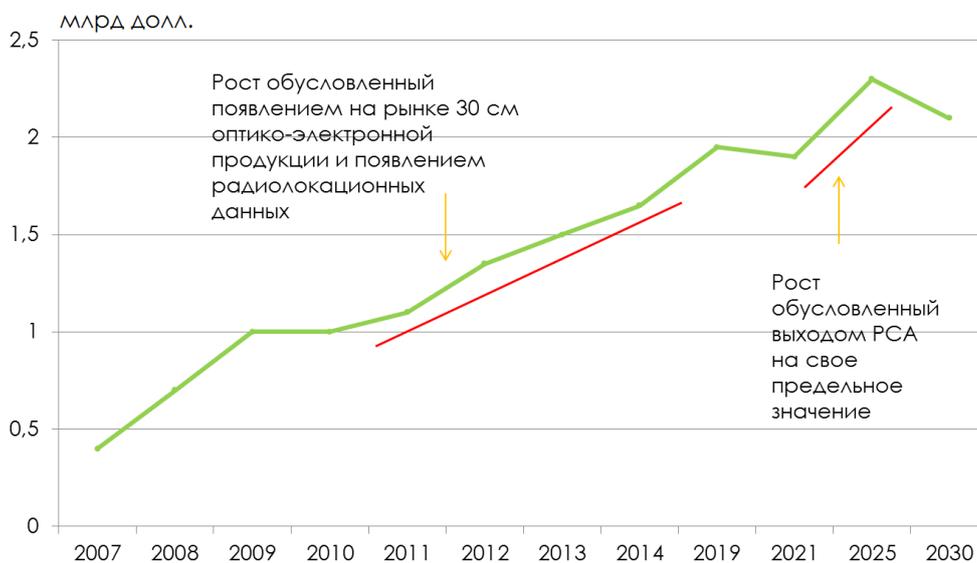


Рис. 4. Прогноз объема выручки на мировом рынке ДЗЗ

В ближайшем будущем многодиапазонные РСА позволят выполнять автоматизированное или, в частных случаях, автоматическое обнаружение объектов, их идентификацию и классификацию [7, 8]. Благодаря этому такие секторы рынка, как национальная оборона, экология, сельское и лесное хозяйство смо-

гут воспользоваться преимуществами современных методов мониторинга [9]. Дальнейшее расширение возможностей и повышение разрешающей способности РСА обеспечит хороший рыночный потенциал, обусловленный реальной на сегодняшний день востребованностью данных сверхвысокого разрешения, чаще всего используемых для создания высокоточных цифровых карт (на рис. 5 красным цветом показана высокая востребованность данных с разрешением менее 0,9 м).

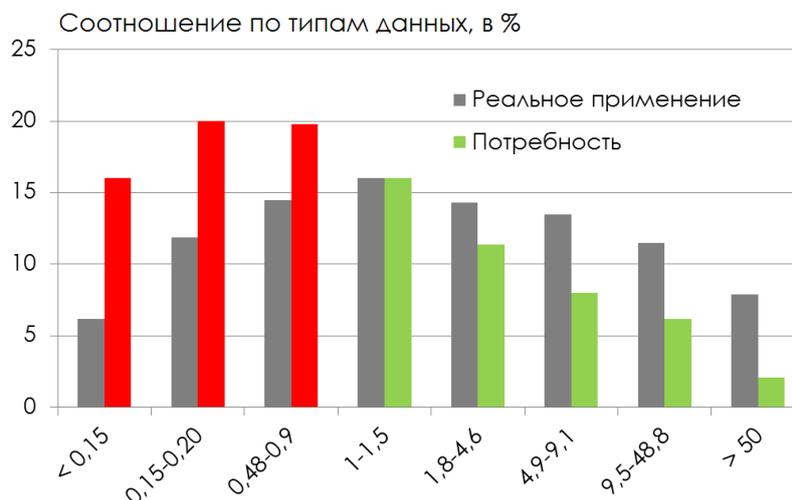


Рис. 5. Оценка реального применения и потребности данных ДЗЗ по критерию необходимой точности (в метрах)

Следует отметить, что не все потребители успевают за бурным ростом компьютерных технологий, особенно в области работы с пространственными данными высокого разрешения и точности. Использование такой информации часто требует достаточно крупных инвестиций в модернизацию оборудования. Кроме того, проблемы высокой стоимости данных ДЗЗ, задержки в их поставке, а также лицензирования и ограничений их продаж весьма часто отпугивают потенциальных потребителей.

Устойчивое развитие отрасли может происходить только при условии постоянного совершенствования технологий и благоприятной государственной политики в отношении сбора и использования данных ДЗЗ, а также исследований и разработок в этой области.

Можно сделать вывод, что современный рынок данных ДЗЗ пока не отвечает запросам научных организаций и государственных заказчиков данных с точки зрения необходимой им точности. В целом индустрия данных ДЗЗ имеет хорошую рыночную динамику, хотя ее дальнейшее успешное развитие будет зависеть от того, насколько законодательство будет тому способствовать. По результатам маркетингового анализа выявлена тесная деловая связь между частными фирмами, государственными предприятиями и научными учреждениями в этом весьма фрагментированном секторе рынка. Новые технологии, новые типы данных ДЗЗ и многомерных сенсоров для аэрокосмической съемки будут, безусловно, способствовать этому росту.

### Анализ рынка беспилотных летательных аппаратов

Наряду с традиционными методами космической и авиационной съемки все более востребованной становится съемка с помощью БЛА (рис. 6).

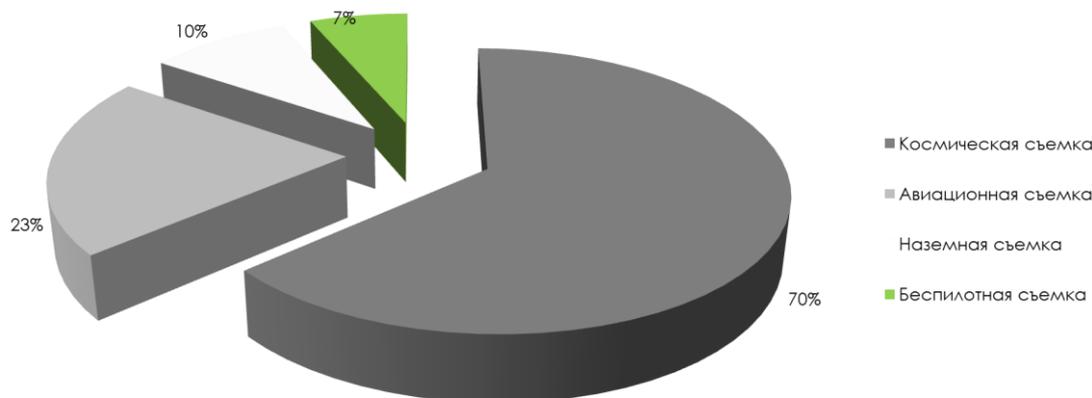


Рис. 6. Соотношение средств получения пространственных данных

Рост потребности применения БЛА особенно проявился в последние годы – на фоне экспоненциального тренда популярности (рис. 7 и 8) БЛА самолетного и вертолетного типов в коммерческой деятельности. У этой тенденции есть положительная и отрицательная стороны. Положительная заключается в том, что общество глубже задумалось о роли БЛА в получении пространственных данных, и это дало ощутимый толчок развитию отрасли в целом. Лидером в этой области являются США, а Россия занимает, по различным данным, 0,6%...3% мирового рынка БЛА (рис. 9).



Рис. 7. Объемы и прогноз мирового и российского рынков БЛА

Отрицательная сторона выражается, опять же, в несовершенстве текущего законодательства в отношении БЛА во многих странах и острой необходимости контроля полетной деятельности в связи с общим увеличением численности действующих устройств и опасностью столкновений в зоне действия гражданской авиации. В этом направлении уже ведутся работы по созданию систем автоматического наблюдения за БЛА. В настоящее время наиболее распространены легкие БЛА среднего (MALE) и ближнего действия (тактические) (рис. 10).

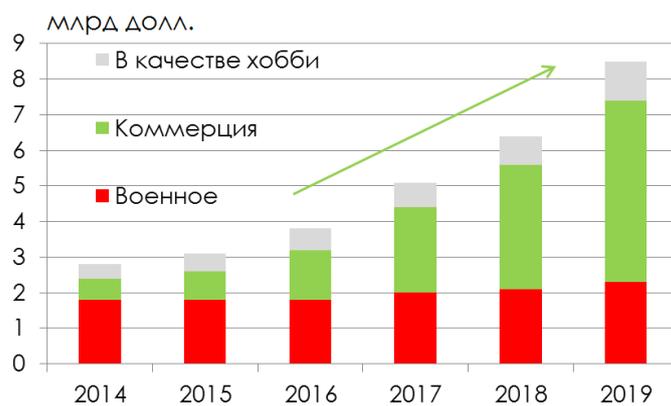


Рис. 8 Общий доход мирового рынка БЛА в 2014–2019 гг.

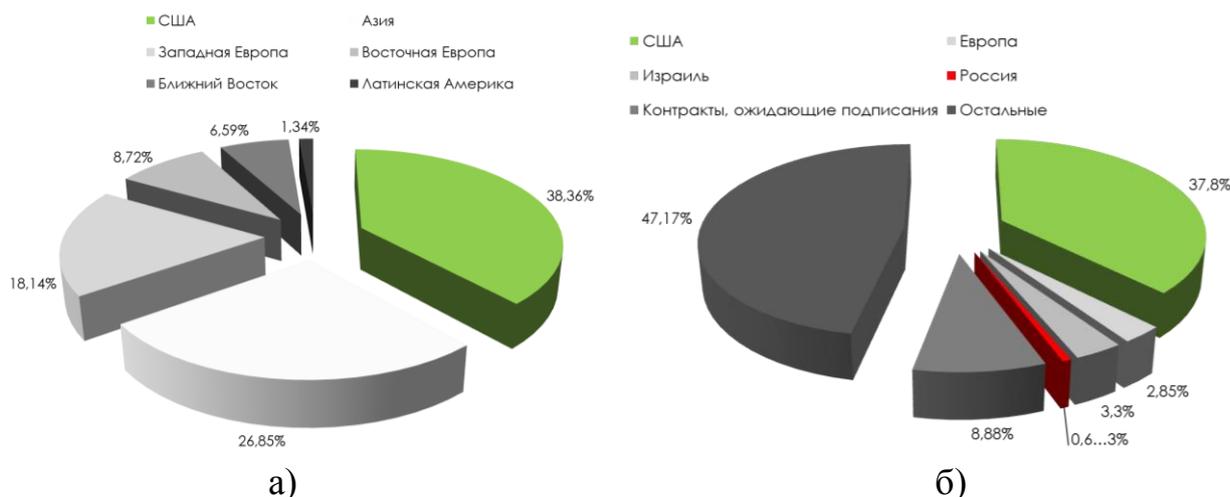


Рис. 9. Прогноз на 2018 год вложения средств в развитие БЛА (а) и доли региональных рынков БЛА (б)

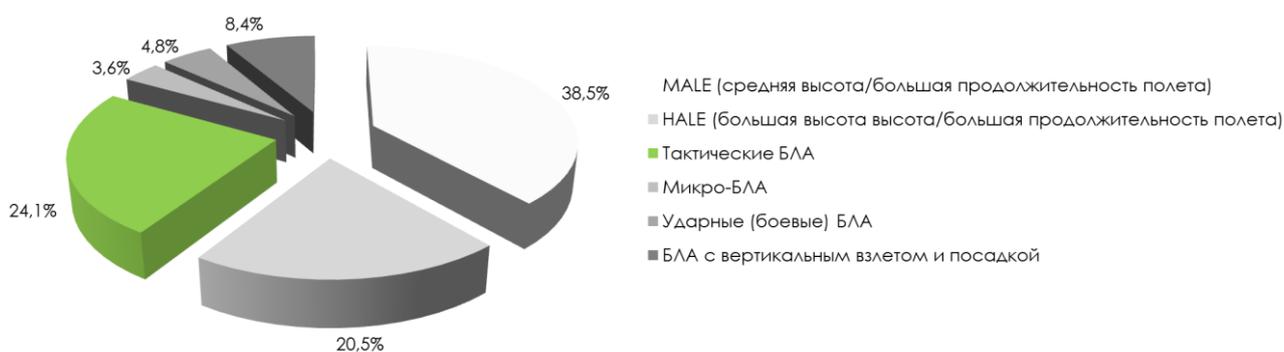


Рис. 10. Прогноз развития рынка БЛА на 2016–2018 годы по производству БЛА по типам

В России в области создания комплексов БЛА работает полтора десятка крупных и небольших фирм. Все разработчики идут в направлении создания номенклатуры многофункциональных комплексов, способных выполнять разнообразные задачи. В итоге потенциальным заказчикам предлагается множество однотипных образцов БЛА, решающих схожие задачи [10].

Таким образом, результаты анализа рынка БЛА в интересах ДЗЗ показали перспективность развития комплексов с БЛА ближнего действия как наиболее целесообразных по экономическим соображениям сегментов всего рынка БЛА.

Результаты исследования рынка БЛА в России выявили наличие успешно используемых в широком спектре задач образцов БЛА с требуемыми характеристиками.

Если соотношение использования в России радиолокационной съемки ДЗЗ с помощью космических и авиационных носителей в целом повторяет мировые тенденции, то рынок применения РСА на БЛА по сравнению с мировым уровнем максимально востребован. Кроме того, рынка многомерных радиолокационных данных в космическом и авиационном сегменте вообще пока не существует. Этим обусловлена полная свобода действий разработчиков и высокая перспективность рынка радиолокационных данных ДЗЗ, полученных с помощью БЛА.

### **Анализ схемотехнических решений и характеристик существующих РСА**

На сегодняшний день существует и успешно функционирует в качестве целевой нагрузки БЛА ближнего действия весьма небольшое число образцов малогабаритных РСА (таблица 1) [11]. Отличительными их особенностями являются упрощенная структура, низкие массогабаритные показатели и энергопотребление, малая мощность излучения и работа со сверхширокополосными ЛЧМ сигналами в режиме непрерывного излучения.

При рассмотрении существующих образцов РСА, устанавливаемых на авиационные носители или разрабатываемых для них в качестве целевой нагрузки, основными критериями отбора являются вышеуказанные особенности. На данный момент известно около сорока действующих малогабаритных РСА, устанавливаемых на БЛА, однако определение их малогабаритности весьма относительное. Так, некоторые разработчики заявляют о создании малогабаритной РСА весом в 10–60 кг, хотя, например, для БЛА ближнего действия этот вес неприемлем. Вследствие того, что общепринятая масса полезной нагрузки таких БЛА варьируется в пределах 1–5 кг, основным критерием при выборе РСА БЛА ближнего действия являются массогабаритные ограничения [12].

Одним из самых успешных проектов по созданию малогабаритной РСА является NanoSAR (ImSAR, США) [13], представленная на рис. 11, а. Радиолокатор работает на частотах UHF, UWB, X, Ku диапазонов, обеспечивает обнаружение, целеуказание и распознавание объектов днем и ночью, в дождь, снег, туман, в условиях запыленности и задымленности района разведки. Боковой обзор в обе стороны производится в маршрутном (StripMap), прожекторном или телескопическом (SpotLight), широкозахватном (Circular или ScanSAR) и селекции движущихся целей (MTI) режимах. Антенная система состоит из четырех микрополосковых антенных решеток, две из которых передающие, а две – приемные. Кроме того, радиолокатор сопряжен с наземной аппаратурой обработки данных, позволяющей в реальном масштабе времени (Lisa Image) получать РЛИ и видео с возможностью приближения и панорамной съемки одновременно в нескольких частотных диапазонах (рис. 11, б), обнаруживать изменения положения объектов (Lisa Change), а также планировать, контролиро-

вать и управлять полетом с помощью курсора (Lisa 3D и Lisa Dashboard). Передача данных осуществляется аппаратурой Viper по помехозащищенным каналам стандартов RS232, Serial TTL и Ethernet.

Таблица 1 – Существующие РСА и их производители

Название	Разработчик	Масса (кг)	Диапазон (ГГц)	Разрешение, (м)
1	2	3	4	5
AIRSAR	Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, США	47	0,439 (P) 1,26 (L) 5,3 (C)	1
ARTINO	Forschungsgesellschaft für Angewandte Naturwissenschaften, Германия	52	Ka	0,2
ASAR	NASA/ Jet Propulsion Laboratory, США	31	C,L,P	2,5
CARABAS-II	Swedish Defence Research Agency (FOI), Швеция	8/200	0,021-0,085 (VHF)	2,5
CP-SAR	Microwave Remote Sensing Laboratory, Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University, США	< 25	1,27 (L)	1
DMSAR	ISRO	18	C	1
DO-SAR	EADS	22	S,C,X,Ka	< 0,5
E-SAR	DLR	43	P,L,C,X	2
EMISAR	DCRS	14	C,L	2
F-SAR	DLR	59	P,L,S,C,X	0,3
GeoSAR	EarthData	53	P,X	1
IMARC	НПО ВЕГА-М, Россия	98	VHF,P,L,X	1,5
Ingara	DSTO	77	X	0,3
KOMSAR	Agency for Defense Development	37	X	1,5
Компакт	НИИ ТП, Россия	5-13	X,L,P,VHF (8.6,1.3,0.43,0.14)	0,5
LORA	FOI	8	0.2-0.8 (VHF,UHF)	< 1
Lynx	Sandia National Laboratories, США	50	15,2-18,2	0,3
Lynx II	Sandia National Laboratories, США	38	15,2-18,2	0,1
MicroSAR (μSAR)	Space Dynamics Laboratory, США Brigham Young University, США	2 (2,67)	1,75 (L) 5,56 (C)	< 1 1,8
MiniSAR	Sandia National Laboratories, США	11	16,8	0,1
MiSAR	EADS, Multimedia University, Малайзия	< 4	C	0,5x0,4
MMW SAR	Italy, Salenia Corporation, Италия	60	35	5
NanoSAR B	ImSAR, США	1,6	Ku, X, UHF	< 0,3
NanoSAR C	ImSAR, США	0,9	Ku, X, UWB, UHF	< 0,3
NuSAR	Space Dynamics Laboratory, США Brigham Young University, США	8,6	1,75 9,75	0,3
OrbiSAR	OrbiSAT	48	P,X	0,5
PAMIR	FGAN	65	X	0,1
Pi-SAR	JAXA	21	X, L	1,5
RAMSES	ONERA	66	0.4-0.47(P), 1.2-1.4(L), S,C, 9.31-9.61(X), Ka,Ku,W	0,13
SlimSAR	Brigham Young University, США	3,6	UHF, C, L, X	< 1
Star-3,4,5,6	Intermap Technologies	37	X	0,75
TopoSAR	Intermap Technologies	14	X, P	1,5
Twin-Otter SAR	Sandia National Laboratories	16	VHF,UHF,X,Ku,Ka	0,3
YINSAR	Brigham Young University, США	1,1	X	1
UAVSAR	Multimedia University, Agency Remote Sensing of Malaysia, Малайзия	< 20	5,3	5

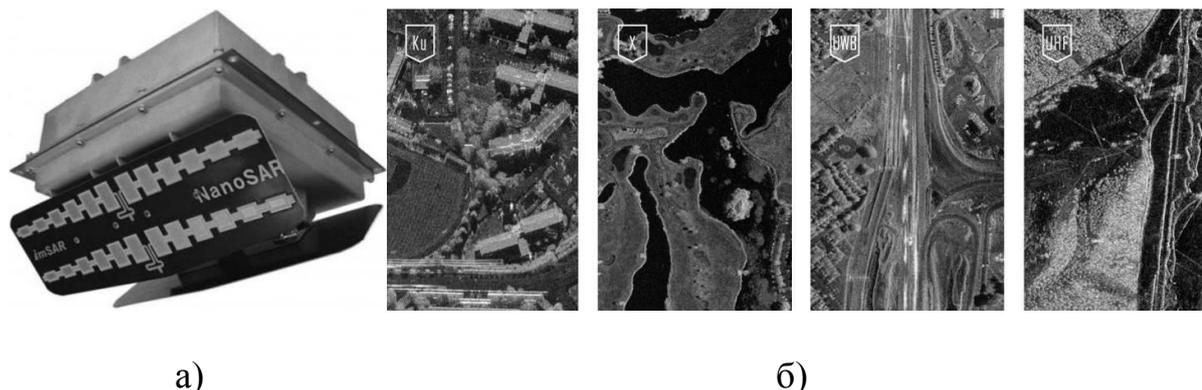


Рис. 11. Внешний вид PCA NanoSAR (а) и РЛИ, полученные в Ku, X, UWB и UHF диапазонах частот (б)

Разрешающая способность по дальности зависит от режимов работы и достигает значений менее 0,3 м на дальностях 1–16 км. Общий вес радиолокатора составляет всего 0,9 кг, при этом выходная мощность передатчика достигает 15 Вт с питанием 12–28 В и потребляемой мощностью 25–70 Вт. К сожалению, архитектура NanoSAR и применяемые сигналы разработчиком не раскрываются, однако анализ зарубежных публикаций, косвенно касающихся рассматриваемого образца, позволяет говорить об используемом непрерывном линейном частотно-модулированном и сверхширополосном (СШП) сигналах со схемой построения без использования промежуточных частот.

Еще одним успешным проектом считается многодиапазонная поляриметрическая PCA SlimSAR (ARTEMIS, США) [14], работающая в диапазонах: UHF, S, L и X, с шириной спектра 660 МГц и весом 3,6 кг (рис. 12).

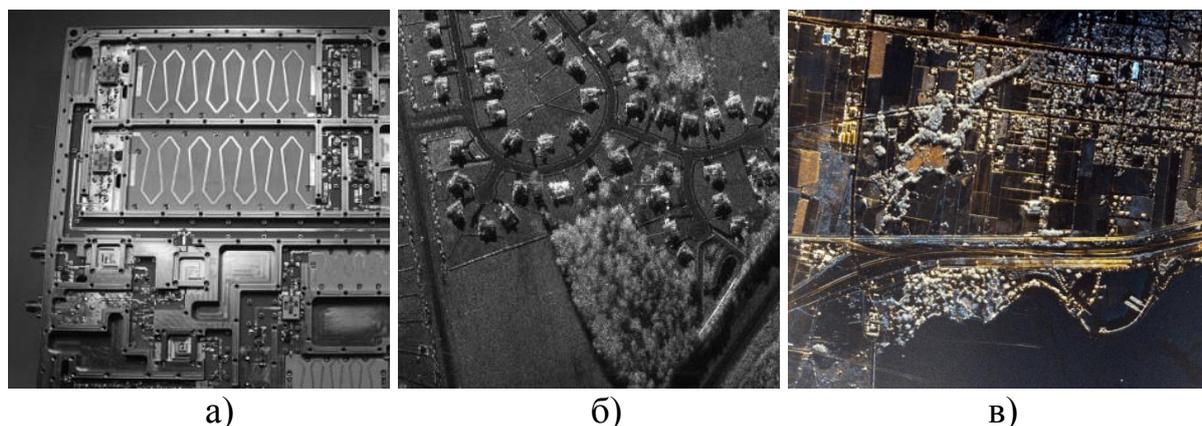


Рис. 12. Внешний вид PCA SlimSAR (а), РЛИ, полученное в X диапазоне (б) и поляриметрическое РЛИ (в)

Мощность передатчика 4 Вт, разрешающая способность в С диапазоне 0,88 м, в L – 1,76 м. Заявляемая дальность обнаружения 1,5–2,5 км. PCA обеспечивает широкополосный обзор, воспроизведение видеопотока, полную поляризацию, интерферометрические 3D-изображения с точной геопривязкой (цифровые карты местности), индикацию движущихся объектов с вычислением параметров движения и интеграцию в геоинформационные системы.

Самая известная студенческая разработка –  $\mu$ SAR (microSAR) (Brigham Young University, США) [15]. Радиолокатор, представленный на рис. 13, а, предназначен для систем БЛА типа «пустил-забыл» на высотах 100–900 м и скоростях 20–50 м/с. Разрешение по дальности при полосе рабочих частот 80 МГц составляет 1,875 м, при 160 МГц – 0,94 м, разрешение по азимуту 0,15 м (рис. 13, б).

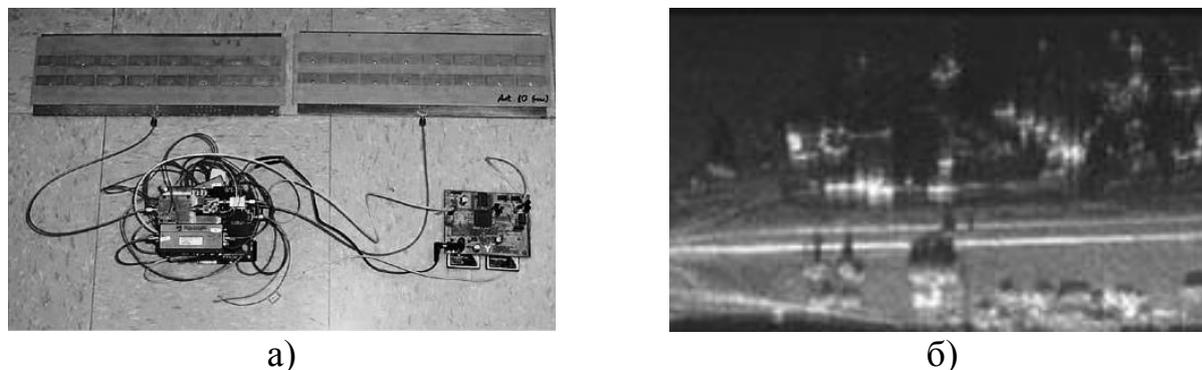


Рис. 13. Внешний вид PCA microSAR (а) и РЛИ С-диапазона (б)

Радиолокатор весит всего около 0,84 кг (по другим данным, менее 2 кг), при этом выходная мощность достигает 1 Вт при потребляемой мощности 16 Вт. Первая microSAR работала в С-диапазоне (5,56 ГГц), последующие образцы работают в С- (5,4 ГГц) и L- (1,75 ГГц) диапазонах. Особенностью архитектуры microSAR является применение высокостабильного задающего генератора 100 МГц STALO (stable local oscillator) и цифрового генератора, управляемого напряжением. Питание схемы обеспечивается бортовой сетью БЛА +12/18 В. В качестве передатчика выступают полосовой фильтр и усилитель мощности 3 Вт, в состав приемника входят малошумящий усилитель и также полосовой фильтр. Первичная обработка сигнала производится без перехода на промежуточные частоты. Антенная система включает в себя две фазированные микрополосковые антенные решетки размером 0,1×0,3 м (2×8 элементов).

Студенты денверского университета (University of Denver, США) [16] также занимаются разработкой малогабаритной PCA. Преимущественной особенностью радиолокатора является рекордно низкий вес – всего 0,23 кг. Планируется и отработывается технология установки и применения PCA на БЛА вертолетного типа (рис. 14). Рабочая частота составляет 5,6 ГГц, полоса частот – 180 МГц. Питание устройства осуществляется от бортовой сети БЛА и составляет 5 и 8 В, потребляемая мощность 4,5 Вт. Запись непрерывного ЛЧМ-сигнала осуществляется платой обработки через аналого-цифровой преобразователь (АЦП) последовательно каждый час на два флеш-накопителя. Кроме того, возможны обработка и передача сигналов в реальном масштабе времени. Наземная обработка сигналов включает в себя компенсацию траекторных искажений на основе записанных в полете навигационных параметров. Съемка земной поверхности осуществляется на БЛА ближнего действия Dakota в маршрутном (Stripmode) режиме.

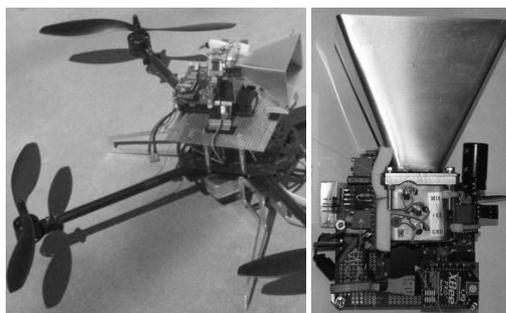


Рис. 14. Внешний вид PCA денверского университета

Структурно PCA состоит из одной рупорной приемо-передающей антенны, высокочастотного блока, АЦП, синхронизатора и линии беспроводной передачи данных. Помимо режима синтезирования апертуры, радиолокатор способен обнаруживать низколетящие маневренные объекты, и может быть установлен на воздушных судах в качестве дополнительного датчика. В настоящее время обработка отраженного радиолокационного сигнала осуществляется после приземления БЛА.

Одной из перспективных многофункциональных малогабаритных PCA является ARBRES (Universitat Politecnica de Catalunya, Испания) [17]. Применяется для проведения интерференционной и поляриметрической съемки подстилающей поверхности в диапазонах С (5,3 ГГц) и Х (9,65 ГГц) (рис. 15, б, в). При этом достигается разрешающая способность 3 и 1,5 м на максимальных дальностях 7,5 и 3,75 км соответственно. Вес радиолокатора без антенн составляет 2,3 кг. В настоящее время реализован промышленный образец в микроэлектронном интегрированном исполнении (рис. 15, а). Структурно ARBRES состоит из блока генератора, передатчика, приемника и блока цифровой обработки. Особенностью схемы является наличие четырех антенн, при этом одна из них (передающая) устанавливается опционально с применением переключателя.

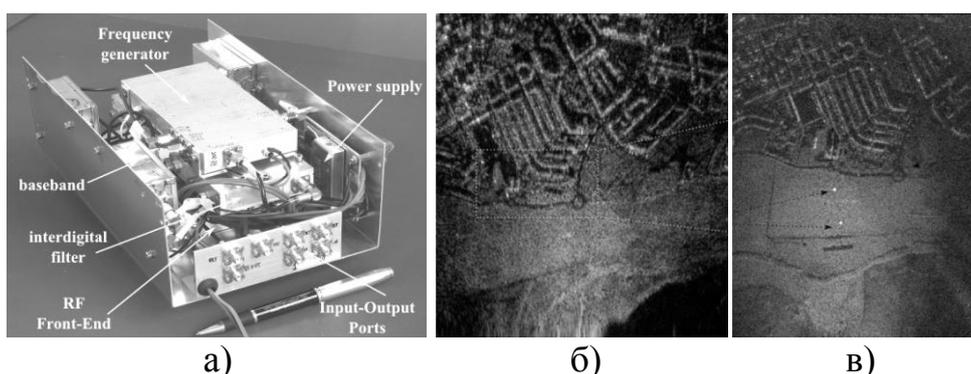


Рис. 15. PCA ARBRES: внешний вид (а), оптическое изображение (б) и РЛИ Х-диапазона (в)

Непрерывный ступенчатый ЛЧМ сигнал (SLFM-CW – stepped linear frequency modulated continuous wave) генерируется цифровым синтезатором частот DDS (direct digital synthesizer). В качестве АЦП используется двухканальный, 14-битный преобразователь PCI формата, со скоростью 65 Мб/с в каждом канале и оперативной памятью 512 Мб.

Испанские разработчики политехнического университета Мадрида представили экспериментальную РСА LFM-CW (Universidad Politécnica de Madrid, Испания) (рис. 16) [18]. Радиолокатор работает в Ка-диапазоне (34 ГГц) с полосой частот 2 ГГц в непрерывном режиме с использованием ЛЧМ-сигнала и функционально состоит из двух антенн, цифрового синтезатора частот (DDS), генератора ЛЧМ сигналов с детектором фазы, передатчика, приемника, модулей частотной и цифровой обработки и компьютера. Заявляемая разрешающая способность составляет 0,15–0,3 м, мощность передатчика около 1 Вт, при этом вес устройства без антенн около 2,5 кг. Анализ архитектуры испанского радара LFM-CW показал классическое для таких систем построение с применением цифровых устройств синтеза, преобразования частот и усиления.

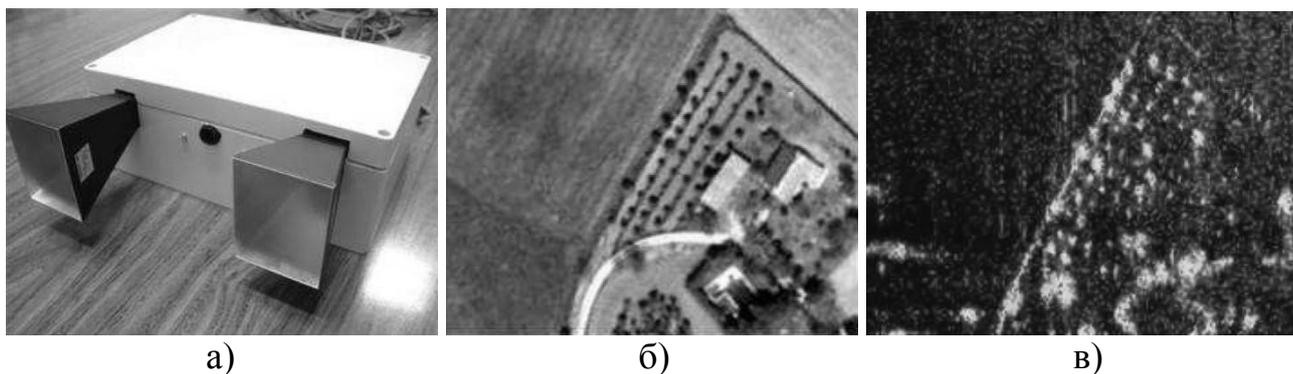


Рис. 16. Внешний вид (а), оптическое изображение (б), РЛИ Ка-диапазона (в) и функциональная схема LFM-CW (г)

Нидерландские ученые и разработчики в 2005 году также представили малогабаритную РСА [19] весом менее 1 кг, работающую в Ка-диапазоне (35 ГГц) (TNO Physics and Electronics laboratory, International Research Centre on Telecommunications-transmission and Radar Delft University of Technology, Netherlands) (рис. 17, а). Применяется для различных задач, требующих обзора земной поверхности на высотах до 800 м. Разрешающая способность РСА достигает 1 м (рис. 17, в). Для оцифровки первичных радиолокационных данных используется 12-битный АЦП с тактовой частотой 5 МГц, для оцифровки траекторных данных – 16-битный АЦП с частотой 100 кГц, для управления частотой ЛЧМ применяется 12-битный ЦАП с частотой 40 МГц.

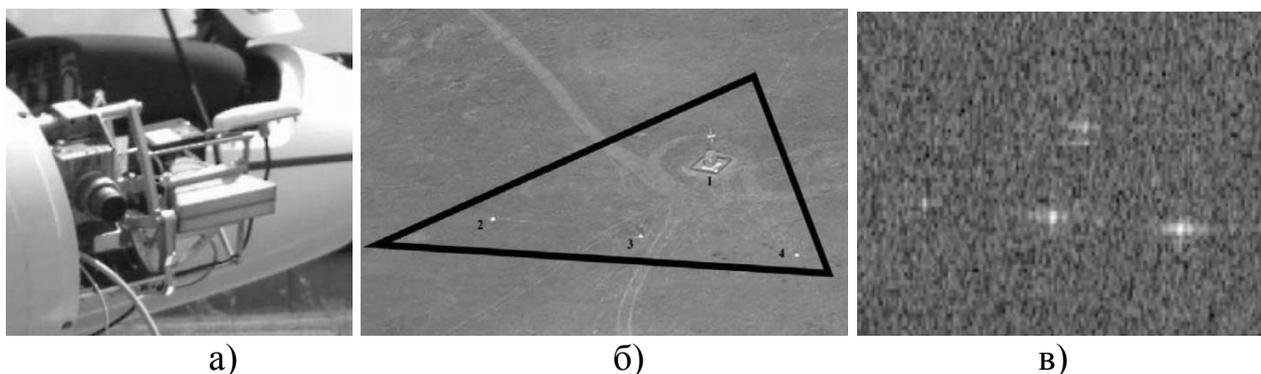


Рис. 17. Внешний вид P-SAR (а), оптическое изображение (б) и РЛИ Ка-диапазона (в)

Вторым этапом развития РСА стал малогабаритный поляриметрический радар с непрерывным излучением и ЛЧМ сигналом P-SAR, работающий в P-диапазоне (450 МГц). РСА разрабатывалась для мониторинга тропических лесов в исследовательских целях, однако, как заявляют разработчики, P-SAR может применяться и для обнаружения объектов, скрытых лесной растительностью (FOPEN – foliage penetration).

Помимо рассмотренных образцов, существует целый ряд известных малогабаритных РСА, не вошедших в данную работу и не удовлетворяющих вышеуказанному критерию установки на БЛА ближнего действия. Это Lynx [20] (General Atomics совместно с Sandia National Laboratories, США) Ku (15,2–18,2 ГГц) диапазона весом 60 кг, MiniSAR [21] (Sandia National Laboratories, США) X диапазона весом 35 кг, NuSAR [22] (Naval Research Laboratory совместно с BYU, США) L (1,75 ГГц), X (9,75 ГГц) диапазонов – 8 кг, CARABAS-II, LORA [23, 24] (Swedish Defence Research Agency, Швеция) VHF (20–86 МГц) диапазона – 11 кг, UAVSAR [25] (Malaysian Remote Sensing Agency, Малайзия) C (5,3 ГГц) диапазона – 20 кг, CP-SAR [26] (Center for Environmental Remote Sensing, Япония) L (1,27 ГГц) диапазона – 13 кг и другие. Анализ их характеристик, архитектуры и принципов функционирования показал более сложную структуру формирования радиолокационных сигналов, импульсный режим с высокой мощностью излучения и многорежимность работы.

Анализ российских публикаций последних лет показал существование работ отечественных разработчиков по созданию малогабаритных РСА. Так, АО «НПП «Радар ММС» заявил о возможности установки своей малогабаритной двухдиапазонной РСА на свой БЛА вертолетного типа, при этом характеристики и состав оборудования не разглашается [27]. Кроме того, с 2005 года АО «НИИ ТП» занимается разработкой и успешным применением многодиапазонной РСА «Компакт» [28], работающий в X, L, P и VHF диапазонах. Одной из самых современных российских малогабаритных РСА является многофункциональная цифровая РЛС двойного назначения «Когитор» (МФ-2) [29] совместной разработки МАИ и ОАО «Корпорация «Фазотрон-НИИР». Радиолокатор работает в двух диапазонах: X и Ka, при этом максимальное разрешение составляет 0,5 м и 0,25 м соответственно. Особенно следует отметить большой диапазон дальностей: от 0,2 км до 168 км. Масса двухдиапазонной РСА МФ-2 менее 55 кг, однодиапазонной – 30 кг (Ka-диапазон) и 22 кг (X-диапазон). Особенностью данной РЛС является возможность работы как по воздушным, так и по наземным целям с режимом СДЦ. Кроме того, с помощью МФ-2 возможно получение информации о состоянии поверхности земли, атмосферы, акватории, лесных массивов; о состоянии транспортных, сырьевых и энергетических коммуникаций; о стихийных бедствиях и промышленных авариях, катастрофах; о состоянии сельскохозяйственных угодий, строительстве зданий и сооружений.

Вместе с тем, АО «НТЦ РЭБ» совместно с ЗАО «НИИ СТТ» в рамках ОКР «Пазанка» разработан мобильный аппаратно-программный комплекс контроля радиолокационной заметности вооружения и военной техники [30]. Основу комплекса составляет малогабаритная РСА трех диапазонов частот (L, C и X), размещаемая на БЛА (рис. 18).



Рис. 18. БЛА «Мерлин-21Б» с РСА С-диапазона

Модуль РСА L-диапазона предназначен для формирования зондирующего ЛЧМ сигнала, предварительного его усиления, приема отраженного сигнала, выделения сигнала разностной частоты и усиления его до напряжения, необходимого для работы АЦП. Рабочая полоса частот модуля L-диапазона составляет 1215–1400 МГц, период повторения сигнала 1,6 мс. Структурно модуль состоит из источника питания напряжением 5В, управляющего микроконтроллера, предварительного усилителя, приемника и видеоусилителя с АРУ. В составе бортовой цифровой платформы П-01 (производство ЗАО «НИИ СТТ») модуль питается через разъем РСІ-Е. При настройке – через разъем внешнего питания. Модуль РСА С-диапазона структурно аналогичен модулю L-диапазона. Рабочая полоса частот 5250–5725 МГц, период повторения также 1,6 мс. Модуль РСА X-диапазона предназначен для формирования непрерывного ЛЧМ сигнала в диапазоне 9500–9975 МГц, излучения сформированных радиолокационных сигналов и приема отраженных сигналов. Учитывая наиболее эффективные с точки зрения минимальных энергопотребления, массы и габаритов варианты передающего и приемного устройств, принята в качестве конечного варианта функциональная схема РСА X диапазона. Формирователь ЛЧМ сигнала X диапазона построен на основе фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Напряжение питания модулей составляет 9–36 В. Результаты экспериментальных исследований показали максимальную разрешающую способность разработанной РСА 0,3 м.

Приведенные результаты анализа существующих малогабаритных РСА для БЛА ближнего действия показали, что в большинстве случаев радиолокаторы построены по гомодинной схеме с использованием ЛЧМ-сигналов. Применение непрерывного излучения обуславливает малую дальность и низкую мощность излучения, что вполне удовлетворяет условиям применения БЛА ближнего действия. При этом наблюдается тенденция работы таких РСА в нескольких частотных диапазонах, что позволяет обеспечивать обнаружение наземных объектов в зависимости от задач разведки.

Таким образом, относительная простота архитектуры малогабаритных РСА в значительной степени компенсируется алгоритмически сложной цифровой обработкой радиолокационного эхо-сигнала. При этом полученные на выходе данные будут являться существенным дополнением, а в некоторых случаях могут стать единственно достоверной информацией об объектах района непосредственной близости противника [31].

### Структурный синтез оптимальной структуры РСА БЛА

При решении сложной задачи разработки оптимальной структуры РСА для БЛА ближнего действия по критерию минимума массогабаритных показателей должна учитываться, в самом общем случае, эффективность решения выполняемых РСА функций. Кроме того, при оптимизации разработки и размещения оборудования дополнительно используют стоимость затрат на его проектирование, разработку, изготовление и стоимость непосредственно радиоэлектронных компонентов, плат и антенн. Поэтому оптимизация разработки и размещения РСА на БЛА приобретает сложный многокритериальный характер. В работе используется только два независимых, по сути, параметра: массогабаритная характеристика и эффективность. Независимость в данном случае обусловлена простой логикой: масса оборудования не является необходимым или достаточным условием его эффективности.

Для оценки массогабаритных показателей авторами предложено использовать условную «плотность» изделия, характеризующую массогабаритные показатели – соотношение массы к объему: то есть, чем меньше масса и объем модулей и антенн РСА, тем меньше «плотность». Расчет объема оборудования производится суммированием объемов модулей и блоков без антенн (в большинстве случаев антенны размещены «за бортом» БЛА), а масса – с учетом антенн, так как они являются важным слагаемым в массе целевой нагрузки БЛА.

При оценке эффективности обычно используется вероятностный подход, однако в таком случае придется многократно проводить эксперимент или моделирование применения РСА, что не входит в перечень поставленных в задач и не соответствует целям. В данной работе принята следующая методика оценки эффективности. Предположим, что РСА выполняет задачи картографирования и обнаружения целей. При картографировании важнейшим параметром РСА является ее разрешающая способность. Вероятность обнаружения целей также зависит, помимо дальности и прочих технических параметров и условий наблюдения, от разрешающей способности РСА. При этом крайне желательным условием является соответствие разрешающих способностей по дальности и азимуту  $\delta_D = \delta_{Az}$ , что обуславливает выбор единого параметра, характеризующего разрешающую способность  $\delta$  в целом. При этом естественно полагать, чем меньше значение данного параметра, тем выше (лучше) разрешающая способность.

Таким образом, предлагаемый условный минимаксный двухпараметрический критерий оптимальности схемы РСА при размещении на БЛА ближнего действия будет выглядеть следующим образом:

$$K_{РСА-БЛА}^{opt} = \frac{\min \left( \frac{m}{h \times l \times w} \mid \begin{array}{l} m \leq M_{цн} \\ (h \times l \times w) \leq V_{цн} \end{array} \right)}{\max \left( \delta \mid \begin{array}{l} \delta_D \rightarrow 0 \\ \delta_{Az} \rightarrow 0 \end{array} \right)}, \quad (1)$$

где  $m$  – масса оборудования,  $h$ ,  $l$ ,  $w$  – высота, длина и ширина модулей соответственно,  $M_{цн}$  – ограничение по массе полезной нагрузки БЛА,  $V_{цн}$  – ограничение по объему контейнера для полезной нагрузки БЛА,  $\delta$  – разрешающая способность РСА при минимальных  $\delta_D = \delta_{Az}$ . Комплексное сравнение принципов функционирования и вариантов схем построения позволит выбрать оптимальный вариант компоновки РСА по наименьшему  $K_{РСА-БЛА}^{opt}$ .

В работе [32] рассмотрено большое количество известных способов формирования частотно-модулированных сигналов – от аналоговых на основе линий задержки до цифровых как с применением кольца ФАПЧ, так и на основе прямого цифрового синтеза. Учитывая высокую стабильность выходного сигнала, возможность микроконтроллерного управления, хорошую промышленную повторяемость, а также ограничения на стоимость, массогабаритные показатели и потребляемую мощность необходимо отдано предпочтение цифровым системам на основе ФАПЧ. При этом положительным фактором является то, что отечественные предприятия выпускают специализированные микросхемы, способные конкурировать с зарубежными аналогами.

Исходя из вышеизложенного, авторами выбран способ построения высокочастотной части радиолокационных станций, используемый для реализации авиационных радиовысотомеров, основанный на использовании непрерывных ЛЧМ сигналов, разнесения приема и передачи сигналов за счет использования двух антенн и гомодинной обработки отраженных сигналов. На рис. 19 приведена оригинальная структурная схема РСА «Три-М» [33] («малогабаритная малой мощности») с системой обработки и технической реализацией принципа синтезирования апертуры, где обозначены: ГПН – генератор пилообразного напряжения, ГУН – генератор, управляемый напряжением, АтГ – аттенюатор, УМ – усилитель мощности, ДМ – делитель мощности, СМ – смеситель, МШУ – малозумящий усилитель, ПРД А и ПРМ А – передающая и приемная антенны соответственно.

Главным недостатком такой схемы является относительно небольшая дальность действия вследствие низкого энергетического потенциала РСА. Кроме того, из-за проникающего сигнала, наращивание мощности передатчика не приводит к увеличению дальности действия (с ростом мощности излучения пропорционально растут шумы на входе приемника). Поэтому, как правило, дальность действия РЛС с непрерывным излучением ограничена 10–20 км.

С точки зрения оптимизации затрат на реализацию обработки сложных сигналов с большими базами, гомодинная схема построения с непрерывным ЛЧМ сигналом является целесообразной. В таких приемниках подавление помех и основное усиление сигнала осуществляется на низкой частоте, что реализуется существенно проще и дешевле. Для исследования основных принципов функци-

онирования по такой схеме построения создана лабораторная установка на рельсе с макетом РСА «Три-М», внешний вид которой представлен на рис. 20.

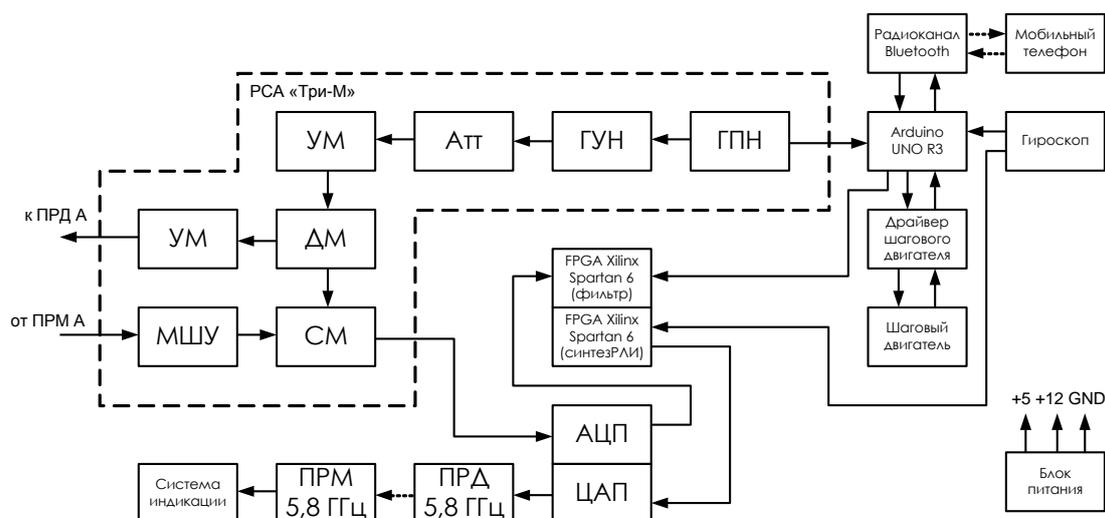


Рис. 19. Структурная схема лабораторной установки с РСА «Три-М»

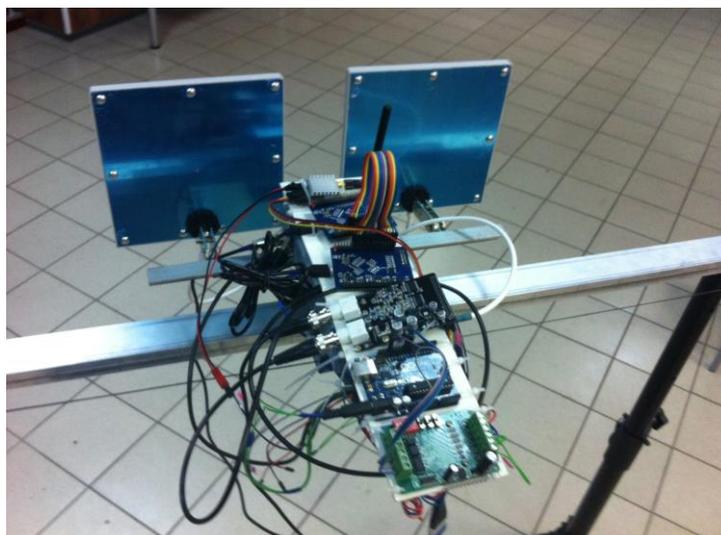


Рис. 20. Внешний вид макета первого варианта РСА

В структуру локатора дополнительно внесены две программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) Xilinx Spartan 6 для проведения исследований эффективности алгоритмов вторичной обработки траекторного сигнала [34, 35]. Вес макета с антеннами составил 1,2 кг, габариты 0,1×0,2×0,03 м (без антенн), а разрешающая способность – около 1,5 м, что является неприемлемым согласно критерию (1). Рабочая полоса частот составляет 2360–2440 МГц, при этом разрешающая способность достигает 1,5 м. Диапазон частот выбирался из соображений безопасности для здоровья человека при проведении исследований, а также относительно низкой стоимости комплектующих. Низкая разрешающая способность РСА обусловлена, прежде всего, выбранным S-диапазоном и недостаточной шириной рабочей полосы частот зондирующего сигнала, формируемой неспециализированным ГУН MiniCircuits ZX95-2536C+. Несмотря на недостатки первого варианта схемы построения РСА, в процессе

исследований получен большой опыт создания алгоритмов синтеза и автофокусировки РЛИ.

Предлагаемый второй вариант построения РСА с непрерывным ЛЧМ излучением в полосе частот 5,2–6,0 ГГц и прямым преобразованием частоты, исключающий недостатки первой схемы и удовлетворяющий критерию (1), подробно описан в [36] представлен на рис. 21.

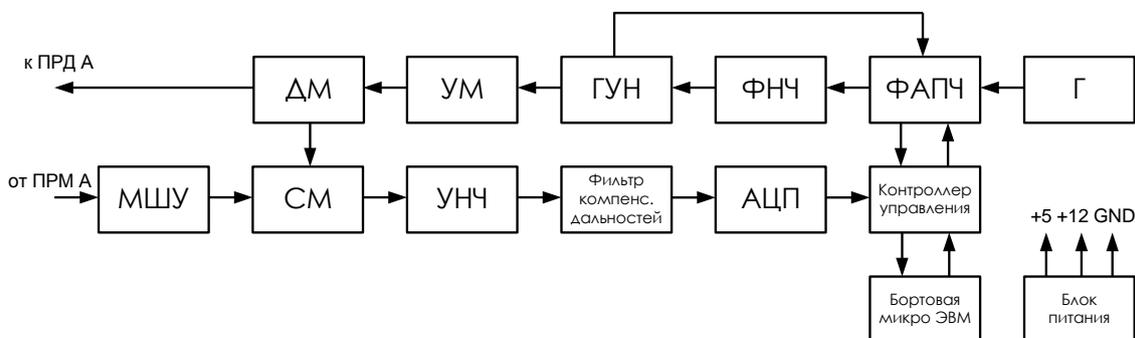


Рис. 21. Структурная схема предлагаемой в работе РСА «Три-М»

Одним из определяющих отличий предлагаемой в работе структуры от известных и рассмотренных вначале, является реализация удаленного цифрового управления параметрами сигнала (вид модуляции, рабочая частота, полоса частот и длительность импульсов). Управление функционированием радиолокатора осуществляется через быстродействующий 32-битный двухъядерный микроконтроллер NXP LPC4320 на базе ARM Cortex M4 204 МГц командами от микро ЭВМ с четырех-ядерным 64-битным микроконтроллером ARM Cortex A53 с тактовой частотой 1,5 ГГц, ОЗУ 2 Гб и операционной системой Linux Ubuntu 16.04 [37]. Напряжение питания элементов структурной схемы составляет 3,3–12 В.

Существующий в большинстве подобных РСА недостаток значительного снижения уровня мощности отраженного от целей на больших удалениях сигнала исключен в предлагаемой РСА включением в схему фильтра компенсации дальностей, представляющего собой LC-фильтр нижних частот, предусилительный каскад и активный фильтр высоких частот 2-го порядка, собранный по схеме Саллена-Ки с большой крутизной амплитудно-частотной характеристики (40 дБ на декаду).

Кроме того, приведенная на рис. 21 структура малогабаритной РСА позволила дополнительно повысить разрешающую способность за счет компенсации с помощью фильтра Калмана нерегулярных нелинейностей модуляционной характеристики ГУН, возникающих вследствие превышения диапазона рабочих температур окружающей среды и напряжения питания [38].

С целью исключения случаев выхода из строя радиочастотных компонентов структуры вследствие неисправности стабилизаторов напряжений, что особенно актуально при тестировании радиолокатора сразу после сборки, схема разделена на две многослойные печатные платы (радиочастотную и цифровую), соединенные 30-контактным разъемом (рис. 22).

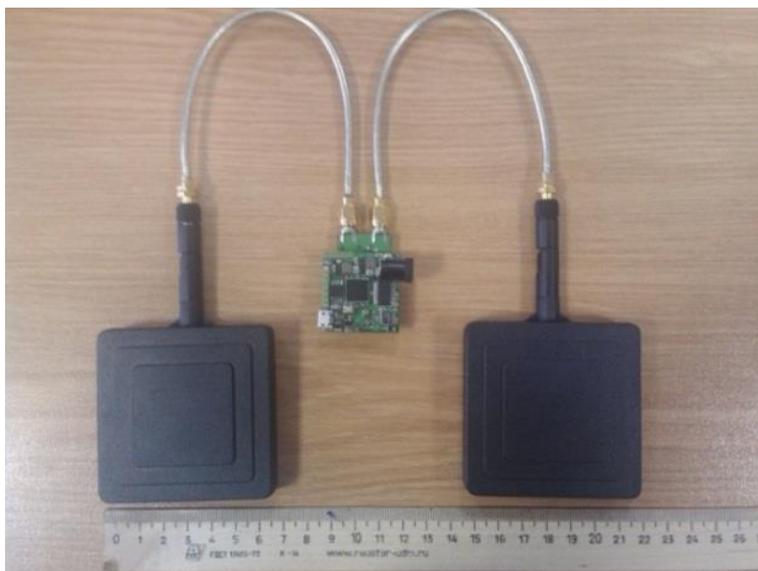


Рис. 22. Внешний вид разработанной РСА с антеннами

Обработка траекторного сигнала производится в микро ЭВМ на борту БЛА и включает в себя квазиоптимальные алгоритмы синтеза и автофокусировки РЛИ, реализованные на языке Python и определяющие итоговое значение разрешения РЛИ по азимуту и дальности.

### **Параметрический синтез оптимальных и квазиоптимальных алгоритмов формирования РЛИ с компенсацией флуктуаций траектории движения БЛА ближнего действия**

Для синтеза (формирования) РЛИ, полученных с помощью РСА с непрерывным ЛЧМ излучением, удобнее всего применять фильтровый подход, в рамках которого используются современные и достаточно эффективные модификации алгоритмов частотного масштабирования и дальность-Доплер. Для повышения разрешающей способности по координатам азимут-дальность используется расширение спектра сигнала за счет доплеровского набега фазы (частоты) в сечении сигнала по азимутальной координате движения БЛА и за счет ЛЧМ зондирующих сигналов в сечении по наклонной дальности. Корреляционная (согласованная) обработка комплексной огибающей принимаемого сигнала в этих сечениях обеспечивает сжатие сигналов от элементарных отражателей поверхности по обеим координатам. При этом предполагается, что траектория движения носителя линейна и постоянна скорость движения. Однако на интервале синтеза апертуры антенны имеются отклонения по высоте и скорости, обусловленные турбулентностью атмосферы. Такие смещения вносят искажения в фазовый портрет и значения времени задержки сигнала от целей, что, в конечном счете, искажает РЛИ. Если параметры движения носителя известны, целесообразно их использовать для коррекции РЛИ. В связи с тем, что БЛА ближнего действия в полете более восприимчивы к внешним физическим воздействиям, то учитывать флуктуации движения носителя просто необходимо.

Алгоритмы компенсации движения носителя в импульсно-доплеровских РЛС используются уже давно и хорошо изучены. Однако принципиальные от-

личия непрерывных РСА делают невозможным их применение. В импульсно-доплеровских РЛС предполагается, что в пределах импульса носитель является неподвижным, а в непрерывных РСА движение должно учитываться постоянно.

В статье синтезированы оптимальный и квазиоптимальный алгоритмы компенсации флуктуаций траектории БЛА, пригодные для использования после вышеуказанных алгоритмов синтеза РЛИ. В качестве критерия оптимальности выбран минимум фазовой ошибки. Представленные алгоритмы также исправляют ошибки дальности, вызванные флуктуациями поступательного движения носителя с амплитудой сдвига, большей чем интерполированное значение.

Примем, что частота зондирующего сигнала изменяется от начальной до конечной, определяя девиацию частоты  $\Delta f$ . Время, в течение которого изменяется частота, определяется полосой частот  $\Delta F$  и периодом повторения  $T_p$ .

Участок передаваемого сигнала с повышением частоты во временной области может быть представлен как:

$$s_t(t, \eta) = e^{j(\phi + \omega_0 t + \pi k_r t^2)}, \quad (2)$$

где  $t, \eta$  – время на маленьком и большом масштабах соответственно,  $\phi$  – начальная фаза. Участок сигнала с понижением частоты может быть задан с учетом начальной частоты, равной  $f_0 + \Delta F$  и девиации частоты  $\Delta f$ .

Отраженный сигнал от цели, находящийся на дальности  $R(t, \eta) = \sqrt{R_0^2 + v^2(t + \eta)^2}$  и соответствующей временной задержкой  $\tau = 2R(t, \eta)/c$  может быть определен как

$$s_r(t, \eta) = e^{j(\phi + \omega_0(t - \tau) + \pi k_r(t - \tau)^2)}, \quad (3)$$

где  $R_0$  – минимальная дальность до объекта.

Демодулированный сигнал после смесителя и ФНЧ запишется следующим образом:

$$s_{dc}(t, \eta) = e^{j(\omega_0 r + \pi k_r t r - \pi k_r r^2)}. \quad (4)$$

Представленный в виде (4) сигнал подлежит обработке с целью синтеза РЛИ. Алгоритм дальность-Доплер включает в себя сжатие по дальности с быстрым преобразованием Фурье (БПФ) по дальности и переход в частотную область с БПФ по азимуту.

Компенсация миграции дальности может быть реализована с помощью стандартных интерполяционных методов, однако это приводит к увеличению вычислительных затрат. Кроме того, компенсируется доплеровское приращение частоты, обусловленное постоянным движением носителя. Сжатие по дальности выполняется путем умножения на импульсную характеристику азимутального согласованного фильтра (СФ):

$$H_{az}(f_\eta, R_0) = e^{j \frac{4\pi R_0}{\lambda} D(f_\eta, v)}, \quad (5)$$

где  $D(f_\eta, v) = \sqrt{1 - \lambda^2 f_\eta^2 / 4v^2}$  – коэффициент миграции дальности,  $v$  – путевая скорость движения носителя,  $\lambda$  – длина волны зондирующего сигнала.

Аналогично алгоритму дальность-Доплер, для работы с демодулированным сигналом на частоте биений может быть модифицирован и алгоритм частотного масштабирования. При этом компенсация флуктуаций параметров движения носителя может производиться без интерполяции. В связи с этим алгоритм частотного масштабирования является основным при обработке непрерывных ЛЧМ сигналов.

Алгоритм частотного масштабирования включает в себя ряд Фурье преобразований и фазовых перемножений. При известной нелинейности ЛЧМ, она может быть компенсирована модифицированной функцией [39]. В начале обработки сигнала алгоритмом частотного масштабирования выполняется БПФ в азимутальном направлении над сигналом (4). Результирующий сигнал в частотной области может быть записан как:

$$S(t, f_{\eta}) = e^{j \frac{4\pi R_0 D(f_{\eta}, \nu)}{\lambda}} e^{j \frac{4\pi k_r R_0}{D(f_{\eta}, \nu)}} e^{j^2 f_{\eta} t} e^{-j\pi k_r t^2}. \quad (6)$$

Функция частотного масштабирования используется с дополнительным коэффициентом, исключая доплеровский сдвиг, то есть

$$H_1(t, f_{\eta}) = e^{-j(2\pi f_{\eta} t + \pi k_r t^2 (1 - D(f_{\eta}, \nu)))}. \quad (7)$$

После БПФ по дальности применяется функция, корректирующая остаточную фазу видеосигнала следующим образом:

$$H_2(f_r, f_{\eta}) = e^{\frac{-j\pi f_r^2}{k_r D(f_{\eta}, \nu)}}. \quad (8)$$

Следующая после обратного БПФ по дальности функция выполняет обратное частотное масштабирование

$$H_3(t, f_{\eta}) = e^{-j\pi k_r t^2 (D(f_{\eta}, \nu)^2 - D(f_{\eta}, \nu))}. \quad (9)$$

Таким образом, осуществляется второй этап коррекции дальности и соответствующей ей фазы. Затем снова выполняется БПФ по дальности и применяется фильтрация, выполняющая роль сжатия по азимуту. Результатом обратного БПФ по азимуту является сфокусированное изображение.

Рассмотренные алгоритмы получения РЛИ предполагают, что носитель движется по прямолинейной траектории с постоянной скоростью. Однако реальная траектория на интервале синтезирования апертуры антенны претерпевает существенные изменения, которые вносят погрешности и ошибки в накапливаемые данные и искажают РЛИ.

Поступательное движение вызывает смещение носителя от идеальной (заданной) траектории. Это приводит к изменению дальностного портрета сцены и вызывает противоречие фазового портрета. Цель на дальности  $R$  измеряется как  $R + \Delta R$  и обусловлена частотным сдвигом демодулированного сигнала (4), который можно переписать как

$$s_{\Delta dc}(t, \eta) = e^{j(\alpha_0(\tau + \Delta\tau) + 2\pi k_r t(\tau + \Delta\tau) - \pi k_r (\tau + \Delta\tau)^2)}, \quad (10)$$

где  $\Delta\tau = 2\Delta R/c$ . Цели, расположенные в пределах ширины луча диаграммы направленности, имеют ненулевую частоту Доплера, зависящую от различных

дальностей в пределах азимутального направления. На рис. 23 дальности до целей  $A$  и  $B$  в процессе движения определяются по-разному.

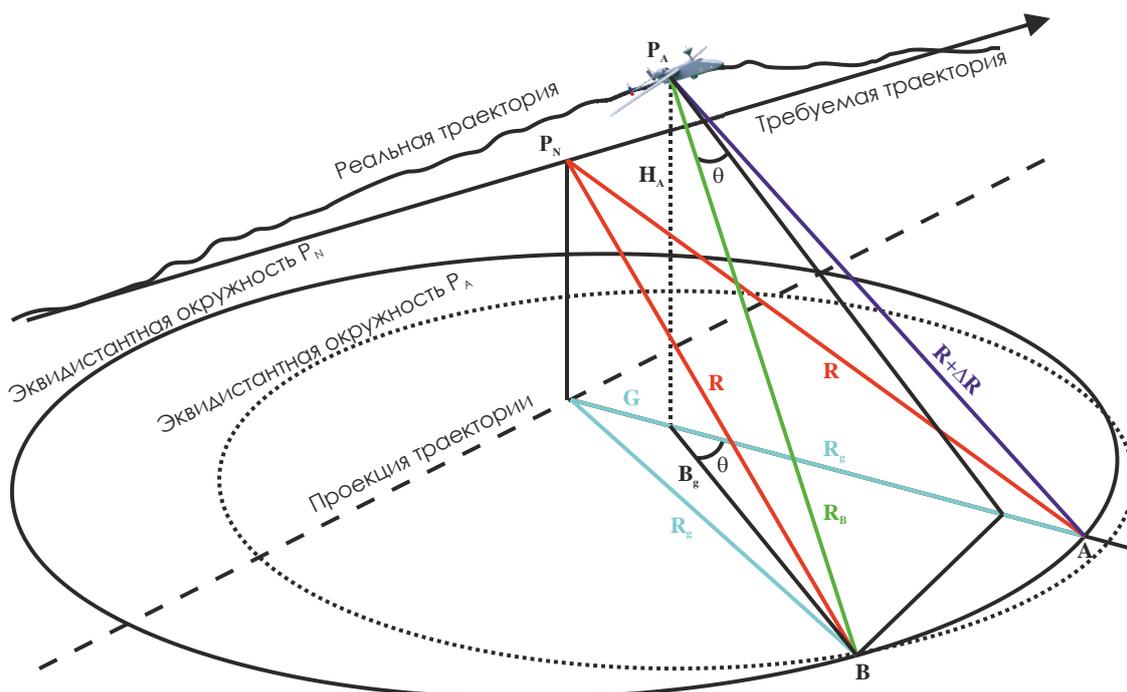


Рис. 23. Геометрия коррекции флуктуаций движения носителя PCA

Изменения в путевой скорости приводят к неравномерности выборки зондирующих импульсов на земле, что, в конечном счете, искажает фазовый портрет сцены. Изменение углов тангажа, крена и рыскания приводит к ошибкам разного рода. Флуктуации тангажа приводят к смещению полосы обзора на земле, крена – к изменению характера усиления антенны над сценой, а углов рыскания – к перекосам РЛИ. Если доплеровский спектр сдвинут так, что часть его лежит вне полосы доплеровских частот, то происходит наложение. Сжатие по азимуту дает затенение изображения по азимуту в местах, где доплеровская частота ошибочно равна нулю.

Разработанные ранее методы и алгоритмы компенсации параметров движения не учитывают реальные искажения движения носителей в случае непрерывных ЛЧМ PCA. В известных методах [40] компенсация движения применяется к строковым данным, а затем к данным, сжатым по дальности. Такой подход учитывает, что в пределах импульса носитель неподвижен. В случае непрерывной ЛЧМ PCA при сжатии по дальности теряется возможность учета движения в пределах периода модуляции.

В случае ЛЧМ сигнала PCA коррекция движения может быть применена напрямую к демодулированному сигналу (10) или в частотной области путем коррекции частот после БПФ по азимуту, примененному к строкам данных. Поскольку каждый отсчет содержит информацию о значении дальности, а параметры коррекции зависят от дальности и азимута, то любые изменения, примененные в частотной области являются действительными только для одной дальности и одного значения азимута. Тем не менее, с некоторым приближением, приведенные ограничения могут быть ослаблены.

В общем случае, параметры движения накапливаются гораздо более медленными темпами, чем данные РСА. Для непрерывных ЛЧМ РСА параметры движения могут быть интерполированы так, чтобы каждый отсчет данных РСА имел соответствующую информацию о позиции (в отличие от импульсных систем, где каждый импульс обладает такой информацией). Вместе с тем, каждый отсчет данных должен иметь соответствующую информацию с исправленной ошибкой.

Для цели на дальности  $R$ ,  $\Delta R$  вычисляется как разница между идеальным и реальным расстояниями. На рис. 23 рассматривается геометрия на плоскости. При этом если существуют более точные параметры плоскости, представленная модель может быть скорректирована.

При известных координатах цели  $A$ , а также реальной (точка  $P_A$ ) и идеальной (точка  $P_N$ ) траекториях, из полученной геометрии возможно вычислить  $R$  и  $R+\Delta R$ . При этом  $\Delta\tau$  обновляется в каждый отсчет. Ошибки движения корректируются фильтром

$$H_{MC}(t, \Delta\tau) = e^{-j(\omega_0\Delta\tau + 2\pi k_r t \Delta\tau - \pi k_r (2\pi\Delta\tau - \Delta\tau^2))}. \quad (11)$$

Применение фильтра к данным (в строках во временной или частотной области) позволяет сдвинуть дальность до цели и уточнить фазу.

В случае наличия нескольких целей в пределах ширины диаграммы направленности на одной дальности, но на разных азимутах, сдвиг дальности будет различным благодаря поступательному движению носителя. Для заданных значений азимута на рис. 23, цель  $B$  находится на позиции, где частота Доплера  $f_\eta$ . Угол на цель  $B$  можно записать как:

$$\theta(f_\eta) = \sin^{-1}\left(\frac{f_\eta \lambda}{2v}\right). \quad (12)$$

Как видно из рис. 23, дальность  $R+\Delta R$  и угол  $\vartheta$  выводятся из данных РСА, а высота  $H_A$  и дальность  $R$  находятся из параметров движения. Определим правильный треугольник на земной поверхности с гипотенузой  $B_g$  и сторонами  $B_g \cos(\vartheta)$  и  $B_g \sin(\vartheta)$  и угол  $\phi$  между прямыми  $R_g$  и  $G$ . Исходя из определений, получим выражения:

$$\sin(\phi) = \frac{B_g \sin(\vartheta)}{R_g}, \quad (13)$$

$$\cos(\phi) = \frac{G + B_g \cos(\vartheta)}{R_g}, \quad (14)$$

$$\arcsin\left(\frac{B_g \sin(\vartheta)}{R_g}\right) = \arccos\left(\frac{G + B_g \cos(\vartheta)}{R_g}\right). \quad (15)$$

В представленных равенствах две неизвестных  $B_g$  и  $\vartheta$ . Затем рассмотрим выражение:

$$\operatorname{tg}(\theta) = \frac{B_g \sin(\vartheta)}{\sqrt{(B_g \cos(\vartheta))^2 + H_A^2}}. \quad (16)$$

Неизвестные  $B_g$  и  $\vartheta$  находятся из системы уравнений (15) и (16) путем символьных вычислений.

В частном сложном геометрическом случае, представленном на рис. 23, найден угол на земле  $\vartheta(\theta(f_\eta), R_g, G, H_A)$ , из которого определяются дальность:

$$B_g(f_\eta) = -\cos(\vartheta)G \pm \sqrt{\cos^2(\vartheta)G^2 + R_g^2 - G^2} \quad (17)$$

и реальная дальность до цели  $B$

$$R_B(f_\eta) = \sqrt{H_A^2 + B_g^2}. \quad (18)$$

Затем можно найти  $\Delta R = R - R_B(f_\eta)$  и  $\Delta \tau = 2\Delta R(f_\eta)/c$  и применить (12) к данным в частотной области. Эта коррекция правомерна для единичных значений дальности и азимута.

Точная корректировка ошибок движения таким способом требует высоких вычислительных затрат. Для каждого пикселя РЛИ применяется корректировка в частотной области при заданных значениях дальности и азимута. Данные обрабатываются с помощью сжатия по дальности, затем каждая точка данных сохраняется. Составное сжатое по дальности изображение создается из таких отдельных точек, а окончательное изображение получается после сжатия по азимуту. Для сокращения вычислительных затрат можно использовать приближения, и, тем самым, сохранить преимущества разработанного алгоритма. Например, в случае узкого луча диаграммы направленности, ошибки, вызванные движением, считают постоянными для дальностей в пределах полосы доплеровских частот. Такой подход и соответствующее приближение используется во многих алгоритмах компенсации. В качестве альтернативы такого приближения, для исходных данных используют фильтр (11), однако коррекция правомерна только для одной дальности. Поэтому сначала получают составные изображения, сжатые по дальности, а затем сжимают данные по азимуту.

Дальнейшее упрощение алгоритма возможно путем разделения на два этапа. На первом этапе корректируется опорная дальность  $R_{ref}$ .  $\Delta R_{ref}$  вычисляется как и ранее, через  $\Delta \tau_{ref} = 2\Delta R_{ref}$  и  $\tau_{ref} = 2R_{ref}/c$ . Затем вычисляется

$$H_{MC1}(t, \Delta \tau_{ref}) = e^{-j(\omega_0 \Delta \tau_{ref} + 2\pi k_r t \Delta \tau_{ref} - \pi k_r (2\tau_{ref} \Delta \tau_{ref} - \Delta \tau_{ref}^2))}. \quad (19)$$

На втором этапе используется дифференцированная коррекция после сжатия по дальности, при этом информация о положении усредняется в пределах каждого периода модуляции. Такая коррекция вычисляется для каждого отсчета дальности  $R_0$  с рассчитанными  $\Delta R_0$ ,  $\Delta \tau = 2\Delta R_0/c$  и  $\tau_0 = 2R_0/c$ . Так,  $H_{MC}(t, \Delta \tau_0) / H_{MC}(t, \Delta \tau_{ref})$  или

$$H_{MC2}(\tau_0, \Delta \tau_0) = e^{j(-\omega_0 \Delta \tau_0 + 2\pi k_r \tau_0 \Delta \tau_0 - \pi k_r \Delta \tau_0^2 + \omega_0 \Delta \tau_{ref} - 2\pi k_r \tau_{ref} \Delta \tau_{ref} + \pi k_r \Delta \tau_{ref}^2)}. \quad (20)$$

Это похоже на общепринятую модель компенсации движения, но с некоторыми преимуществами. Кроме того, сдвиг по дальности, вызванный поступательным движением, корректируется без интерполяции. На рис. 24 представлена модель РЛИ точечной цели и пример коррекции движения с использованием разработанного алгоритма.

Так, при отклонении до 1 м траектории от заданной на расстоянии 15 м (рис. 24, д), искаженное РЛИ точечной цели представлено на рис. 24, а. В идеальных условиях РЛИ будет иметь вид, показанный на рис. 24, б (е). Стандартный алгоритм коррекции движения, как видно из рис. 24, в (ж), не справляется со своей задачей и ошибка коррекции приводит к искажению РЛИ со смещением. Применение разработанного алгоритма коррекции флуктуаций траектории движения носителя, как приведено на рис. 24, г (з).

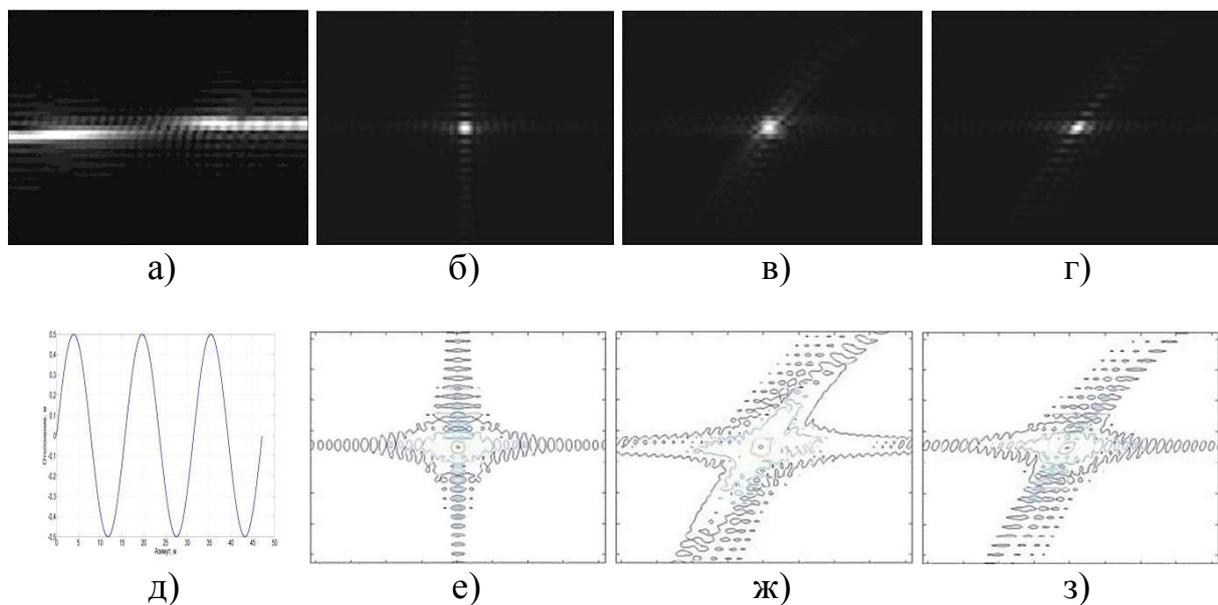


Рис. 24. Модель РЛИ точечного объекта с искажениями вследствие флуктуаций траектории движения носителя и примеры коррекции

Ошибки, введенные при рассмотрении двухэтапного приближенного метода, значительно меньше ошибок при использовании известных методов. Обозначим ошибку фазы, обусловленную приближениями в функции коррекции движения, как

$$\phi_E = \frac{4\pi\Delta R_e}{\lambda}, \quad (21)$$

где  $\Delta R_e$  – ошибка вычисления требуемой коррекции за счет поступательного движения. Для предлагаемой коррекции отсутствует ошибка, обусловленная движением, в то время как при известной компенсации ошибка первого этапа имеет вид:

$$\Delta R_{e1} = \Delta R_{ref}(t) - \Delta R'_{ref}, \quad (22)$$

где  $\Delta R_{ref}(t)$  – изменяющаяся во времени коррекция поступательного движения, учитывающая параметры движения в период модуляции ЛЧМ сигнала,  $\Delta R'_{ref}$  – постоянная для каждого периода.

Для компенсации на втором этапе ошибка одинакова для обоих случаев и равна:

$$\Delta R_{e2} = (\Delta R_{ref}(t) - \Delta R_0(t)) - (\Delta R'_{ref} - \Delta R'_0). \quad (23)$$

Очевидно, что применение предлагаемого алгоритма позволяет минимизировать ошибку коррекции фазы на  $\Delta R_{e1}$ .

Таким образом, предлагаемый алгоритм формирования РЛИ с компенсацией флуктуаций траектории движения БЛА ближнего действия на основе известного алгоритма частотного масштабирования состоит из последовательных шагов: первый этап компенсации траектории движения (19), БПФ по азимуту, частотное масштабирование (7), БПФ по дальности, коррекция (8), обратное БПФ по дальности, обратное частотное масштабирование (9), БПФ по дальности, обратное БПФ по азимуту, второй этап компенсации движения (20), БПФ по азимуту, сжатие по азимуту (5) и обратное БПФ по азимуту. Известный алгоритм формирования РЛИ дальность-Доплер предлагается модифицировать следующим образом: первый этап компенсации движения (19), БПФ по дальности, второй этап компенсации движения (20), БПФ по азимуту, коррекция миграций дальности (известная как РСМС – range cell migration correction), сжатие по азимуту (5) и обратное БПФ по азимуту.

### Параметрический синтез оптимального и квазиоптимального алгоритмов автофокусировки РЛИ

Пусть  $y_{mk} \in \mathbb{C}$  есть одно из  $k=1, \dots, N$  измерений дальности, каждое из которых содержит по  $M$  элементов разрешения, формирующих матрицу  $M \times N$ . Номера строк соответствуют элементам разрешения, номера столбцов – профилю дальности. При приближенном суммировании и обратном БПФ по столбцам различными способами можно получить РЛИ

$$y_{mn} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} e^{j2\pi kn/N} \tilde{y}_{mk}, \quad (24)$$

где  $y_{mn} \in \mathbb{C}$  – один из  $(m, n)$  элементов изображения и  $n$  в данном случае относится к одной из координат (наклонной дальности или доплеровской координате).

В связи с тем, что фазовый портрет искажен постоянной фазовой ошибкой от импульса к импульсу, её следует скомпенсировать введением фазовой корректировки на каждый отсчет. Пусть вектор фазовой коррекции  $\varphi = \{\varphi_1, \dots, \varphi_N\}$ , последовательность импульсов ( $k=1, \dots, N$ ) с уже измененной фазой  $\tilde{z}_{mk} = e^{j\varphi_k} y_{mk}$  и

$$z_{mn}(\varphi) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} e^{j2\pi kn/N} e^{j\varphi_k} \tilde{y}_{mk} \quad (25)$$

соответствуют сфокусированному изображению. Для удобства и простоты далее будем полагать, что это изображение является функцией фазы  $\phi$ , то есть  $z_{mn} = z_{mn}(\phi)$ . Определенный интерес представляет синтез итерационного алгоритма определения оптимального вектора фазы, при котором энтропия сфокусированного изображения минимальна.

Пусть  $z_{mn} \in \mathbb{C}$  –  $(m, n)$ -й элемент сфокусированного изображения,  $|z_{mn}|^2 = z_{mn} z_{mn}^*$  – его интенсивность,  $E_z = \sum_{m,n} |z_{mn}|^2$  – суммарная «энергия» изображения,  $p_{mn} = |z_{mn}|^2 / E_z$  – нормированная интенсивность пикселя. Тогда энтропия будет определяться как

$$\Phi = - \sum_{m,n} p_{mn} \ln p_{mn}. \quad (26)$$

Без потери общего смысла можно нормализовать  $z$  к единице энергии или переопределить энтропию изображения как  $-\sum_{m,n} |z_{mn}|^2 \ln |z_{mn}|^2$ . И если полная энергия  $E_z$  инвариантна к фазе, то оба случая приведут к одной и той же фазовой оценке. Также следует обратить внимание, что энтропия изображения и энтропия Шеннона  $z$  никак не взаимосвязаны – в данном случае энтропия изображения используется как математически удобная мера фокусировки изображения. Другие меры включают контраст изображения и энтропию Реньи, из которых энтропия Шеннона и резкость изображения являются частными случаями. Так как сфокусированное изображение, как было определено ранее, есть функция фазы, то есть  $z_{mn} = z_{mn}(\phi)$ , выразим энтропию также как функцию от фазовых параметров  $\phi$ :

$$\Phi(\phi) = - \frac{1}{E_z} \sum_{m,n} |z_{mn}|^2 \ln |z_{mn}|^2 + \ln E_z. \quad (27)$$

Тогда оценка фазы по минимуму энтропии будет определяться как

$$\hat{\phi} = \arg \min_{\phi} \Phi(\phi). \quad (28)$$

Следует отметить, что энтропия изображения является инвариантом как к изменению масштаба (то есть  $\Phi(\alpha\phi) = \Phi(\phi)$ ), так и к сдвигу или перестановке пикселей [41]. Таким образом, по энтропии изображения можно оценить компоненты более высокого порядка функции фазовой ошибки, и именно они расфокусируют изображение. Поскольку для (28) нет решения в аналитическом виде, целесообразно использовать итеративную процедуру численной минимизации для решения оптимальных фазовых параметров. В качестве альтернативы методам на основе универсального градиента или поэтапному подходу в работе используются методы оптимизации для получения квазиоптимального итерационного алгоритма.

Сущность методов и алгоритмов оптимизации состоит в преобразовании одной сложной задачи путем минимизации исходной функции  $\Phi(\phi)$  в последовательность более легких в решении задач путем задания последовательности функций подобия  $\Theta(\phi; \phi^{(l)}) \geq \Phi(\phi)$  которая является верхним пределом целевой функции на  $l$ -й итерации, где  $\phi^{(l)}$  –  $l$ -я оценка фазовых параметров. Если функции подобия построены правильно, то результирующая последовательность минимизированных оценок будет сходиться к минимуму первоначальной целевой функции, то есть  $\lim_{l \rightarrow \infty} \arg \min_{\phi} \Theta(\phi, \phi^{(l)}) = \arg \min_{\phi} \Phi(\phi)$ . Для уверенности, что

целевая функция уменьшается (или по крайней мере, не увеличивается) на каждой итерации, используем следующее условие монотонности при заданной функции подобия:  $\Phi(\phi) - \Phi(\phi^{(l)}) \leq \Theta(\phi, \phi^{(l)}) - \Theta(\phi^{(l)}, \phi^{(l)}) \leq 0 \forall \phi$ , где  $\Phi(\phi) - \Phi(\phi^{(l)})$  – изменение в нашей целевой функции на  $l$ -й итерации, ограниченное сверху нулем. Для дифференцируемой функции подобия достаточно следующих условий монотонности:

$$\Theta(\phi^{(l)}, \phi^{(l)}) = \Phi(\phi^{(l)}); \quad (29)$$

$$\frac{\partial}{\partial \phi_k} \Theta(\phi, \phi^{(l)}) \Big|_{\phi=\phi^{(l)}} = \frac{\partial}{\partial \phi_k} \Phi(\phi) \Big|_{\phi=\phi^{(l)}}, \quad k = 1, \dots, N; \quad (30)$$

$$\Theta(\phi, \phi^{(l)}) \geq \Phi(\phi) \forall \phi. \quad (31)$$

Первые два условия (29) и (30) заключаются в том, что функции подобия есть касательные к целевой функции на текущей итерации, при этом третье условие (31) требует, чтобы функция подобия была выше целевой для всех значений параметра вектора  $\phi$ , или наименьшее количество всех значений в пределах интересующего интервала. Так как период изменения фазы  $2\pi$ , то необходимым является только последнее условие (31) на интервале  $[-\pi; \pi]$ .

Энтропия изображения может быть записана в следующей форме:

$$\Phi(\phi) = -1 / E_z \sum_{m,n} f(|z_{mn}|^2) + \ln E_z, \quad (32)$$

где  $f(p) = -p \ln p$  является вещественной вогнутой функцией для  $p > 0$ . Пусть  $g(p, q) = f(q) - (1 + \ln q)(p - q)$  представляет собой ряд Тейлора первого порядка. Поскольку  $f(p)$  является вогнутой, то достаточно просто будет показать, что  $g(p, q)$  удовлетворяет условиям монотонности (29)–(31), как показано на рис. 25.

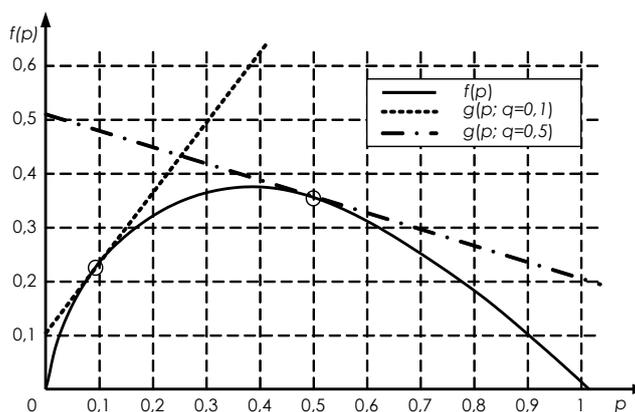


Рис. 25. График функции  $f(p) = -p \ln p$  для двух значений целевой точки  $q$

В результате можно показать, что энтропия изображения ограничена сверху при помощи следующего выражения:

$$\begin{aligned} \Phi(\phi) &\leq -1/E_z \sum_{m,n} g\left(|z_{mn}|^2; |z_{mn}^{(l)}|^2\right) + \ln E_z = \\ &= -1/E_z \sum_{m,n} |z_{mn}|^2 \ln |z_{mn}^{(l)}|^2 + \ln E_z = \Theta(\phi; \phi^{(l)}), \end{aligned} \quad (33)$$

где  $\phi^{(l)}$  и  $z_{mn}^{(l)}$  – оценки фазовых параметров и фазокорректированное изображение соответственно:

$$\Theta(\phi; \phi^{(l)}) = -1/E_z \sum_{m,n} |z_{mn}|^2 \ln |z_{mn}^{(l)}|^2 + \ln E_z \quad (34)$$

и является функцией подобия для исходной функции энтропии изображения, удовлетворяющая условиям монотонности. На рис. 26 показаны варианты функции подобия и энтропии изображения, соответствующие одному фазовому параметру, соответствующему оптимальному (в смысле качества автофокусировки) РЛИ.

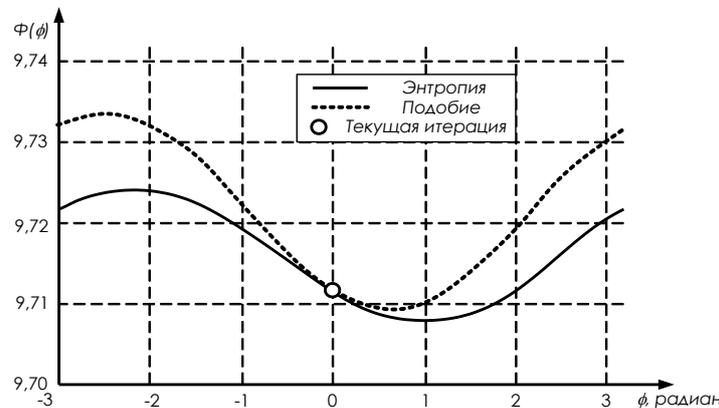


Рис. 26. Варианты функции подобия и энтропии изображения, соответствующие одному фазовому параметру

Хотя функция подобия  $\Theta(\phi, \phi^{(l)})$  линейна при интенсивности  $|z_{mn}|^2$ , одновременная минимизация её на следующей итерации  $\phi^{(l+1)} = \arg \min_{\phi} \Theta(\phi, \phi^{(l)})$  остается сложной задачей в связи с нелинейным сопряжением фазовых параметров со значениями интенсивности  $|z_{mn}|^2$ . В качестве альтернативы одновременной минимизации используем алгоритм убывания координаты, в котором функция подобия минимизируется по одному параметру при прочих неизменных.

Алгоритм убывания координаты (CD) последовательно минимизирует исходную (целевую) функцию по одному параметру, в то время как остальные параметры неизменны. Таким образом, по определению, в данном алгоритме присутствует сходимость к исходной (целевой) функции. В данной работе алгоритм применен для минимизации функции подобия, и когда функция начнет удовлетворять условиям монотонности, то уменьшение функции подобия будет означать уменьшение исходной (целевой) функции на каждой итерации.

Пусть  $\phi^{(l,k)}$  есть оценка фазового параметра на  $l$ -й итерации, где первые  $k-1$  уже обновлены:

$$\phi^{(l,k)} = \left\{ \phi_1^{(l+1)}, \dots, \phi_{k-1}^{(l+1)}, \phi_k^{(l)}, \phi_{k+1}^{(l)}, \dots, \phi_N^{(l)} \right\}, \quad (35)$$

которая определяется как полный цикл итераций по  $N$  фазовым параметрам. Аналогично определяется параметр  $\phi$ :

$$\phi = \left\{ \phi_1^{(l+1)}, \dots, \phi_{k-1}^{(l+1)}, \phi_k^{(l)}, \phi_{k+1}^{(l)}, \dots, \phi_N^{(l)} \right\}. \quad (36)$$

Такой выбор свободных или фиксированных параметров превращает функцию подобия в скалярную функцию  $\psi$  фазового параметра  $\phi_k$ ,  $\psi(\phi_k) = \Theta(\phi, \phi^{(l,k)})$  и задача одновременной минимизации сводится к следующей задаче минимизации скаляра:

$$\phi_k^{(l+1)} = \arg_{\phi_k} \min \psi(\phi_k). \quad (37)$$

Функцию  $\psi$  можно представить в форме  $\psi(\phi_k) = A_k \cos(\phi_k - \phi_k^{(l)}) + B_k \sin(\phi_k - \phi_k^{(l)}) + C_k$ , где постоянные  $A_k, B_k, C_k$  функции подобия и их производные соответствуют текущей итерации  $\phi^{(l,k)}$ . Решение уравнения при  $\psi'(\phi_k) = 0$  позволяет получить решение (37) в аналитическом виде, которое, в свою очередь, позволяет вывести следующие выражения:

$$\phi_k^{(l+1)} = \phi_k^{(l)} + \text{tg}^{-1}(B_k / A_k) \quad (38)$$

и

$$z_{mn}^{(l,k+1)} = z_{mn}^{(l,k)} + \frac{1}{N} e^{\frac{j2\pi kn}{N}} \left( e^{j\phi_k^{(l+1)}} - e^{j\phi_k^{(l)}} \right) \tilde{y}_{mk}, \quad (39)$$

где с каждой итерацией фазовая оценка последовательно обновляется, а затем используется для предыдущей итерации при фокусировке изображения. Для того чтобы использовать нужную ветвь касательной, проводится проверка решения на экстремум путем взятия второй производной  $\psi''(\phi_k) > 0$ , что равносильно

$$A_k \cos(\phi_k - \phi_k^{(l)}) + B_k \sin(\phi_k - \phi_k^{(l)}) < 0. \quad (40)$$

Таким образом, предлагаемый алгоритм автофокусировки РЛИ по минимуму энтропии, в общем случае, состоит из итеративного выполнения следующих шагов: оценка фазовых параметров (38) и фазовая коррекция изображения (39), пока функция подобия не достигнет минимума (37).

Для оценки эффективности работы квазиоптимального алгоритма произведена оценка энтропии одного из полученных изображений известным алгоритмом фазового градиента и предлагаемыми в работе алгоритмами коррекции фазы по минимуму энтропии (*CD* и *SU* – оптимальным и квазиоптимальным соответственно). Как видно из рис. 27, известный алгоритм позволяет достичь минимального значения энтропии 8,58 за меньшее число итераций, при этом ошибка измерения фазы составила 5,6 градусов. Ошибка измерения фазы пред-

лагаемыми алгоритмами составила 2,4 градуса, что подтверждает высокую эффективность автофокусировки РЛИ.

На рис. 28, а представлено РЛИ, синтезированное квазиоптимальным алгоритмом формирования изображения с компенсацией флуктуаций траектории движения БЛА ближнего действия. В данном случае, съемка производилась на автомобиле, движущемся со скоростью 5 км/ч, интервал синтезирования (на изображении справа налево) составил около 30 м, дальность (на изображении снизу вверх) – 120 м, длительность импульса ЛЧМ сигнала – 2 мс.

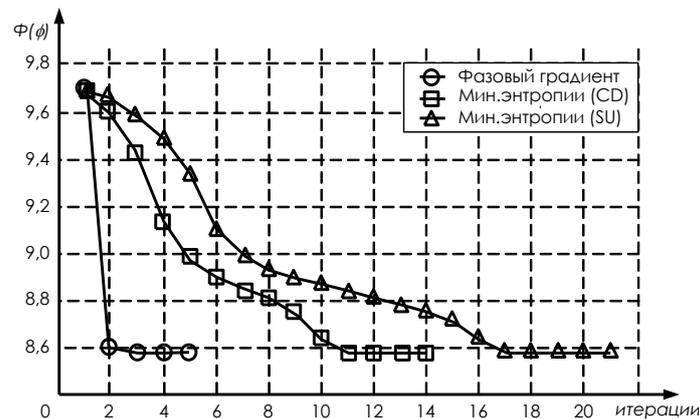


Рис. 27. Зависимость энтропии изображения от числа итераций алгоритмов

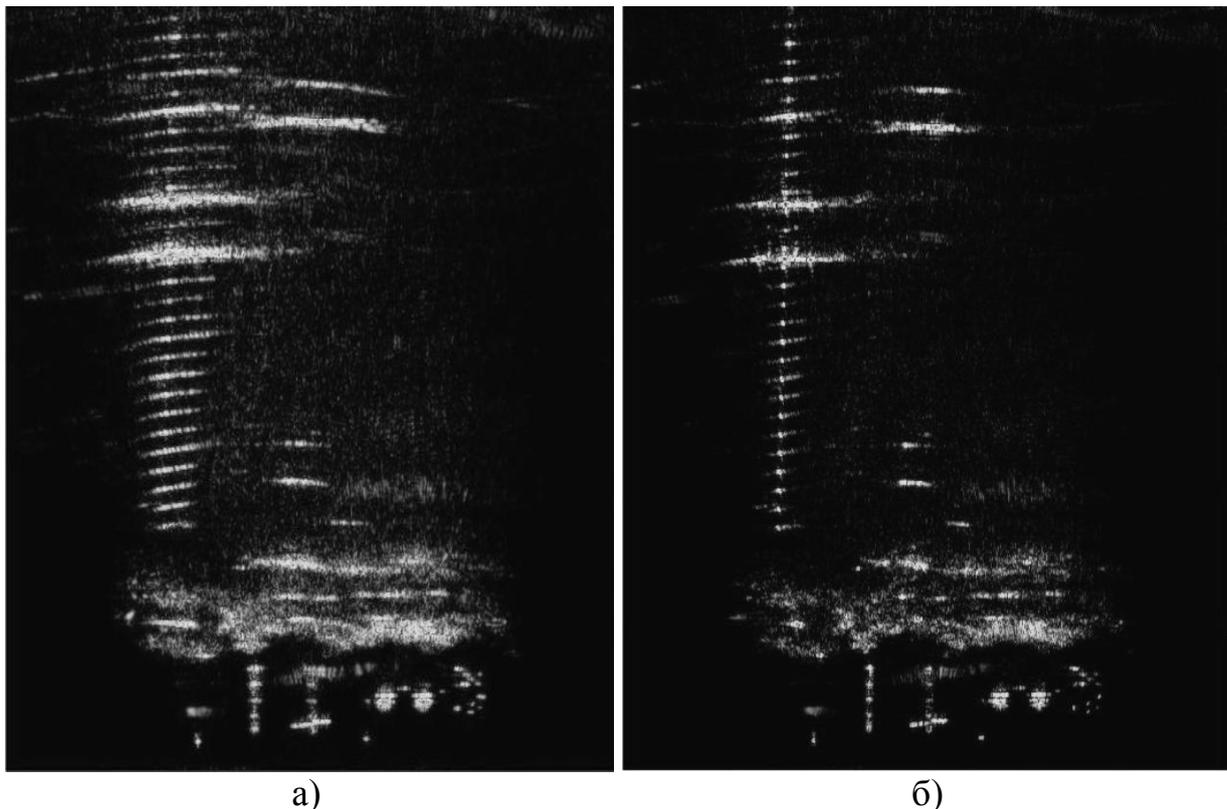


Рис. 28. РЛИ до (а) и после автофокусировки (б)

Как видно на рис. 28, б, квазиоптимальный алгоритм автофокусировки по минимуму энтропии изображения позволяет существенно улучшить качество РЛИ. Вычисленное искажение прямолинейной траектории, соответствующей

щее выполненной коррекции фазы, не превысило 0,06 м. Экспериментальная оценка разрешающей способности разработанной РСА по РЛИ составила 0,19–0,4 м в зависимости от полосы рабочих частот зондирующего сигнала.

### Заключение

Таким образом, на сегодняшний день важность беспилотной авиации не вызывает сомнений. Одним из перспективных ее направлений является развитие БЛА ближнего действия. При этом наблюдается тенденция комплексирования информации, получаемой со всех возможных датчиков, в том числе радиолокационных. В связи с крайне ограниченной массой полезной нагрузки БЛА ближнего действия, установка существующих на данный момент образцов радиолокаторов невозможна по массогабаритным показателям. Поэтому интерес представляет создание малогабаритной радиолокационной станции с синтезированием апертуры. Применение системного подхода к разработке РСА позволило определить роль, место и перспективы радиолокационных данных высокого разрешения, в том числе многомерных, а также выявить параметры, определяющие оптимальность той или иной структуры радиолокатора при размещении на БЛА ближнего действия.

Схемы построения РСА и алгоритмы формирования и автофокусировки РЛИ, полученные в данной статье в результате структурно-параметрического синтеза системы в целом, являются оптимальными – они удовлетворяют определенным в работе критериям: двухпараметрическому минимаксному критерию массогабаритные характеристики-разрешающая способность, критериям минимума фазовых ошибок и минимума энтропии изображения соответственно.

Разработка оптимальной (или в частном случае, рациональной) схемы РСА с требуемыми характеристиками позволит реализовать и эффективно применять радиолокационный модуль БЛА как вспомогательный или, в сложных условиях съемки, основной и единственный источник информации. Представленная методика структурно-параметрического синтеза малогабаритной РСА может быть расширена до многомерного случая – для многодиапазонной поляриметрической РСА БЛА ближнего действия.

### Литература

1. Дорожная карта AeroNet // Национальная технологическая инициатива 2035 [Электронный ресурс]. 03.12.2017. – URL: <http://www.nti2035.ru/markets/aeronet> (дата обращения 03.12.2017).
2. Андрейчиков А. В., Андрейчикова О. Н. Системный анализ и синтез стратегических решений в инноватике: математические, эвристические и интеллектуальные методы системного анализа и синтеза инноваций. – М.: Ленанд, 2015. – 306 с.
3. Кузнецов В. А., Деревин В. В., Бледных И. А., Старков А. М., Стряпчев Э. Н. Анализ рынков беспилотных летательных аппаратов и радиолокационных данных ДЗЗ // Технические науки – от теории к практике:

сборник статей по материалам LXIII Международной научно-практической конференции. № 10. – Новосибирск: 2016. – С. 7-20.

4. Балагуров А. А. Анализ действующего российского законодательства в части положений, связанных с приемом, обработкой и использованием данных ДЗЗ // ГИС-Ассоциация [Электронный ресурс]. 19.10.2016. – URL: [www.gisa.ru/file/file2968.doc](http://www.gisa.ru/file/file2968.doc) (дата обращения 19.10.2016).

5. Анпилогов В. Р. Рынок дистанционного зондирования Земли: индустрия и сервисы на рынке ДЗЗ. – М.: ВИСАТ-ТЕЛ, 2015. – 58 с.

6. Mondello C., Нернер G. F., Williamson R. A. Прогноз ASPRS по развитию рынка ДДЗ на ближайшие 10 лет // ГИС-Ассоциация [Электронный ресурс]. 30.11.2017. – URL: <http://www.gisa.ru/files/file174.doc> (дата обращения 30.11.2017).

7. Кузнецов В. А. Структура и свойства наземных объектов на изображениях РСА в задачах распознавания // Телекоммуникации. 2012. № 10. С. 31-38.

8. Кузнецов В. А., Потоцкий А. Н. Системный подход к решению проблемы автоматического дешифрирования радиолокационных изображений наземных объектов в реальном масштабе времени // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2017. № 2. С. 5-15.

9. Кузнецов В. А., Потоцкий А. Н. Автоматическое обнаружение нефтяных загрязнений по данным спутниковых радиолокационных станций с синтезированной апертурой антенны // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2017. № 10. С. 20-27.

10. Коршунов Н. А. Обзор состояния рынка беспилотных средств, которые могут быть задействованы для охраны лесов от пожаров // ФБУ «Авиалесоохрана» [Электронный ресурс]. 19.10.2016. – URL: <http://www.aviales.ru/files/documents/2009/07/obzor%20rynka%20bla.doc> (дата обращения 19.10.2016).

11. Кузнецов В. А., Баранов М. М. Обзор малогабаритных радиолокационных станций с синтезированием апертуры антенны и непрерывным излучением для беспилотного летательного аппарата ближнего действия // Академические Жуковские чтения: сборник научных статей по материалам II Всероссийской научно-практической конференции. Т. 1. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2015. – С. 21-26.

12. Кузнецов В. А., Баранов М. М. Обоснование требований к РСА беспилотных летательных аппаратов ближнего действия // Молодежные чтения памяти Ю. А. Гагарина: сборник статей по материалам Межвузовской научно-практической конференции курсантов и слушателей. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2014. – С. 29-32.

13. ImSAR NanoSAR C Data and specification sheet // ImSAR [Электронный ресурс]. 19.11.2014. – URL: [http://www.imsar.com/uploads/files/59\\_IMSAR\\_NanoDS\\_Jul2014.pdf](http://www.imsar.com/uploads/files/59_IMSAR_NanoDS_Jul2014.pdf) (дата обращения 19.11.2014).

14. SlimSAR // ARTEMIS [Электронный ресурс]. 03.12.2017. – URL: <http://www.artemisinc.net> (дата обращения 03.12.2017).

15. Long D. G. The BYU microSAR System // Microwave Earth Remote Sensing [Электронный ресурс]. 03.12.2017. – URL: [http://www.mars.byu.edu/yinsar/microSAR\\_descrip3.pdf](http://www.mars.byu.edu/yinsar/microSAR_descrip3.pdf) (дата обращения 03.12.2017).

16. M. de Wit J. J., Hoogeboom P., Otten M. P. G. Feasibility Study Of An FM-CW SAR System // CEOS-SAR [Электронный ресурс]. 03.12.2017. – URL: [ftp://ftp.eorc.jaxa.jp/cdroms/EORC-061/data/f\\_papers/ceos024.pdf](ftp://ftp.eorc.jaxa.jp/cdroms/EORC-061/data/f_papers/ceos024.pdf) (дата обращения 03.12.2017).

17. Aguasca A., Acevo-Herrera R., Broquetas A., Mallorqui J. J., Fabregas X. ARBRES: Light-Weight CW/FM SAR Sensors for Small UAVs // Sensors. 2013. № 13. P. 3204-3216.

18. Edwards M., Madsen D., Stringham C., Margulis A., Wicks B., Long D. A small, robust LFM-CW SAR for operation on UAVs and small aircraft // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2008. P. 514-517.

19. Meta A., de Wit J. J. M., Hoogeboom P. Development of a High Resolution Airborne Millimeter Wave FM-CW SAR // European Radar Conference. Amsterdam, 2004.

20. Tsunoda S. I., Pace F., Stence J., Woodring M. Lynx: A high-resolution synthetic aperture radar // Sandia [Электронный ресурс]. 03.12.2017. – URL: [http://www.sandia.gov/radar/files/spie\\_lynx.pdf](http://www.sandia.gov/radar/files/spie_lynx.pdf) (дата обращения 03.12.2017).

21. MiniSAR – Aerial detection and tracking of moving targets // Metasensing [Электронный ресурс]. 03.12.2017. – URL: <https://www.metasensing-group.com/minisar> (дата обращения 03.12.2017).

22. NuSAR: NRL UAV Synthetic Aperture Radar // Space Dynamics Laboratory [Электронный ресурс]. 03.12.2017. – URL: <http://www.spacedynamics.org/downloads/nusar.pdf> (дата обращения 03.12.2017).

23. Fransson J. E. S., Walter F., Ulander M. H. Estimation of Forest Parameters Using CARABAS-II VHF SAR Data // IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing. 2000. Vol. 38. No. 2. P. 720-728.

24. Henke D., Barmettler A., Meier E. Bistatic Experiment With UWB-CARABAS Sensor – First Results and Prospects of Future Applications [Электронный ресурс]. 03.12.2017. – URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/652f/4fe4865257bdbbc774a0d07dc62d90356323.pdf> (дата обращения 03.12.2017).

25. The Unmanned Aerial Vehicle Synthetic Aperture Radar System // PENTЕК Setting the Standart Signal Processing [Электронный ресурс]. 03.12.2017. – URL: [http://www.pentek.com/applications/17\\_1/RadarSystem.cfm](http://www.pentek.com/applications/17_1/RadarSystem.cfm) (дата обращения 03.12.2017).

26. Rizki Akbar P., Sumantyo J. T., Kuze H. CP-SAR UAV Development // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science. 2010. Vol. 38. No. 8. P. 203-208.

27. Мониторинговый комплекс с беспилотными вертолетами БПВ-500 // Радар ММС [Электронный ресурс]. 03.12.2017. – URL: [http://www.radar-mms.com/Product.aspx?product\\_3\\_2](http://www.radar-mms.com/Product.aspx?product_3_2) (дата обращения 03.12.2007).

28. Внотченко С. Л., Достовалов М. Ю. Авиационные мобильные малогабаритные радиолокаторы с синтезированной апертурой семейства «Компакт» (принципы реализации и опыт применения) // Журнал радиоэлектроники [Электронный ресурс]. 2009. № 10. URL: <http://jre.cplire.ru/mac/oct09/5/text.html> (дата обращения 03.12.2007).

29. Малогабаритная бортовая радиолокационная станция двойного назначения «Когитор» (МФ2) // Московский авиационный институт [Электронный ресурс]. 03.12.2017. – URL: [https://mai.ru/science/results/dev/index.php?ELEMENT\\_ID=33319](https://mai.ru/science/results/dev/index.php?ELEMENT_ID=33319) (дата обращения 03.12.2017).

30. Лихачев В. П., Пашук М. Ф. Многодиапазонная малогабаритная РЛС с синтезированной апертурой антенны. Принципы построения и функционирования, перспективы // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем: материалы VI общероссийской научно-технической конференции. – Омск: ОмГТУ, 2016. – С. 261-271.

31. Канащенков А. И. Интеллект для беспилотника // Авиапанорама. 2012. № 4. С. 11-13.

32. Кузнецов В. А., Баранов М. М. Формирование частотно-модулированных сигналов малогабаритных РСА // Молодежные чтения памяти Ю. А. Гагарина. Перспективы развития авиационного радиоэлектронного оборудования: сборник статей по материалам II Межвузовской научно-практической конференции курсантов и слушателей. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2015. – С. 156-162.

33. Кузнецов В. А., Баранов М. М. Малогабаритная радиолокационная станция с синтезированной апертурой антенны // Молодежь и будущее авиации и космонавтики: аннотации работ 7 Межотраслевого молодежного конкурса научно-технических работ и проектов. – М.: МАИ, 2015. – С. 155.

34. Кузнецов В. А., Арестов Е. Ю. Блок цифровой обработки сигналов РСА на ПЛИС Xilinx // Академические Жуковские чтения. Современное состояние и перспективы развития авиационного радиоэлектронного оборудования: сборник научных статей по материалам III Всероссийской научно-практической конференции. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2016. – С. 27-31.

35. Кузнецов В. А., Овчинников К. А. Цифровой согласованный фильтр РСА на ПЛИС Xilinx // Академические Жуковские чтения. Современное состояние и перспективы развития авиационного радиоэлектронного оборудования: сборник научных статей по материалам III Всероссийской научно-практической конференции. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2016. – С. 221-225.

36. Кузнецов В. А., Гончаров С. А. Структура и элементная база малогабаритной радиолокационной станции С-диапазона // Авиакосмические

технологии: тезисы XVIII Международной научно-технической конференции и школа молодых ученых, аспирантов и студентов. – Воронеж: Элист, 2017. – С. 44-48.

37. Кузнецов В. А., Гончаров С. А. Опыт и основные результаты разработки малогабаритных радиолокаторов для беспилотных летательных аппаратов // Современное состояние и перспективы развития систем связи и РТО в управлении авиацией: сборник статей VI Международной научно-технической конференции, посвященной дню образования войск связи. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2017. – С. 136-140.

38. Кузнецов В. А., Гончаров С. А. Радиолокационная станция с синтезированием апертуры и непрерывным линейно частотно-модулированным излучением // Заявка на изобретение № RU 2016121055, опубл. 01.12.2017, бюл. № 34.

39. Meta A., Hoogeboom P., Ligthart L. P. Non-linear frequency scaling algorithm for FMCW SAR data // Proc. 3rd Eur. Radar Conf. 2006. P. 9-12.

40. Moreira A., Huang Y. Airborne SAR processing of highly squinted data using a chirp scaling approach with integrated motion compensation // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1994. Vol. 32. No. 5. P. 1029-1040.

41. Кузнецов В. А., Гончаров С. А. Алгоритм автофокусировки радиолокационного изображения по энтропии // Академические Жуковские чтения. Современное состояние и перспективы развития авиационного радиоэлектронного оборудования: сборник научных статей по материалам IV Всероссийской научно-практической конференции. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2017. – С. 127-131.

## References

1. Dorozhnaia karta AeroNet [Roadmap AeroNet] *Natsional'naia tekhnologicheskaiia initsiativa 2035* [National Technological Initiative 2035], 03 December 2017. Available at: <http://www.nti2035.ru/markets/aeronet> (accessed 03 December 2017).

2. Andreichikov A. V., Andreichikova O. N. *Sistemnyi analiz i sintez strategicheskikh reshenii v innovatike: Matematicheskie, evristicheskie i intellektual'nye metody sistemnogo analiza i sinteza innovatsii* [System analysis and synthesis of strategic solutions in innovation: mathematical, heuristic and intellectual methods of system analysis and synthesis of innovations]. Moscow, Lenand Publ., 2015. 306 p. (in Russian).

3. Kuznetsov V. A., Derevin V. V., Blednykh I. A., Starkov A. M., Stryapchev E. N. Analiz rynkov bespilotnykh letatel'nykh apparatov i radiolokatsionnykh dannykh DZZ [Analysis of the markets of unmanned aerial vehicles and radar data of remote sensing]. *Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike: sbornik statey po materialam LXIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proceedings of the LXIII International Scientific and Practical Conference “Engineering – from theory to practice”]. Novosibirsk, 2016, no 10, pp. 7-20 (in Russian).

4. Balagurov A. A. Analiz deistvuiushchego rossiiskogo zakonodatel'stva v chasti polozhenii, svyazannykh s priemom, obrabotkoi i ispol'zovaniem dannykh DZZ [Analysis of the current Russian legislation with regard to provisions related to the reception, processing and use of remote sensing data]. 19 October 2016. Available at: <http://www.gisa.ru/file/file2968.doc> (accessed 19 October 2016) (in Russian).

5. Anpilogov V. R. *Rynok distantsionnogo zondirovaniia Zemli: industriia i servisy na rynke DZZ* [Market for Remote Sensing of the Earth: Industry and Services in the Market for Remote Sensing of the Earth]. Moscow, Visat-Tel Publ., 2015, 58 p (in Russian).

6. Mondello C., Hepner G. F., Williamson R. A. Prognoz ASPRS po razvitiuu rynka DDZ na blizhaishie 10 let [The forecast of ASPRS on development of the market of remote sensing for the next 10 years]. *GIS-Assotsiatsiia*, 30 November 2017. Available at: <http://www.gisa.ru/files/file174.doc> (accessed 30 November 2017) (in Russian).

7. Kuznetsov V. A. Struktura i svoistva nazemnykh ob"ektov na izobrazheniakh RSA v zadachakh raspoznavaniia [Structure and properties of surface facilities in the SAR images in pattern recognition]. *Telecommunications*, 2012, no. 10, pp. 31-38 (in Russian).

8. Kuznetsov V. A., Pototskii A. N. Sistemnyi podkhod k resheniiu problemy avtomaticheskogo deshifrirovaniia radiolokatsionnykh izobrazhenii nazemnykh ob"ektov v real'nom masshtabe vremeni [System approach to solving the problem of automatic decoding of ground-based radar images in real time]. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems analysis and information technologies*, 2017, no. 2, pp. 5-15 (in Russian).

9. Kuznetsov V. A., Pototskii A. N. Avtomaticheskoe obnaruzhenie neftnykh zagriaznenii po dannym sputnikovykh radiolokatsionnykh stantsii s sintezirovannoi aperturoi anteny [Automatic detection of oil pollution from satellite synthetic aperture radar]. *Herald of computer and information technologies*, 2017, no. 10, pp. 20-27 (in Russian).

10. Korshunov N. A. Obzor sostoianiia rynka bespilotnykh sredstv, kotorye mogut byt' zadeistvovany dlia okhrany lesov ot pozharov [Overview of the market situation of unmanned vehicles that can be used to protect forests from fires]. *FBU «Avialesookhrana»*, 19 October 2016. Available at: <http://www.aviales.ru/files/documents/2009/07/obzor%20rynka%20bla.doc> (accessed 19 October 2016) (in Russian).

11. Kuznetsov V. A., Baranov M. M. Obzor malogabaritnykh radiolokatsionnykh stantsii s sintezirovaniem apertury anteny i nepreryvnym izlucheniem dlia bespilotnogo letatel'nogo apparata blizhnego deistviia [Overview compact synthetic aperture radar and a continuous radiation for a drone near field]. *Akademicheskie Zhukovskie chteniia: sbornik nauchnykh statey po materialam II Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference “Academic Zhukovsky readings”]. Voronezh, Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy, 2015, vol. 1, pp. 21-26 (in Russian).

12. Kuznetsov V. A., Baranov M. M. Obosnovanie trebovaniy k RSA bespilotnykh letatel'nykh apparatov blizhnego deistviia [Justification of the requirements for SAR of near-range unmanned aerial vehicles]. *Molodezhnye chteniia pamiati Iu. A. Gagarina: sbornik statey po materialam Mezhvuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii kursantov i slushateley* [Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference "Youth readings in memory of Yu. A. Gagarin"]. Voronezh, Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy, 2014, pp. 29-32 (in Russian).

13. ImSAR NanoSAR C Data and specification sheet. *ImSAR*, 03 December 2017. Available at: [http://www.imsar.com/uploads/files/59\\_IMSAR\\_NanoDS\\_Jul2014.pdf](http://www.imsar.com/uploads/files/59_IMSAR_NanoDS_Jul2014.pdf) (accessed 19 November 2014).

14. SlimSAR. *ARTEMIS Inc*, 03 December 2017. Available at: <http://www.artemisinc.net> (accessed 03 December 2017).

15. Long D. G. The BYU microSAR System. *Microwave Earth Remote Sensing*, 03 December 2017. Available at: [http://www.mars.byu.edu/yinsar/microSAR\\_descrip3.pdf](http://www.mars.byu.edu/yinsar/microSAR_descrip3.pdf) (accessed 03 December 2017).

16. M. de Wit J. J., Hoogeboom P., Otten M. P. G. Feasibility Study Of An FM-CW SAR System. *CEOS-SAR Conf*, 03 December 2017. Available at: [ftp://ftp.eorc.jaxa.jp/cdroms/EORC-061/data/f\\_papers/ceos024.pdf](ftp://ftp.eorc.jaxa.jp/cdroms/EORC-061/data/f_papers/ceos024.pdf) (accessed 03 December 2017).

17. Aguasca A., Acevo-Herrera R., Broquetas A., Mallorqui J. J., Fabregas X. ARBRES: Light-Weight CW/FM SAR Sensors for Small UAVs. *Sensors*, 2013, no. 13, pp. 3204-3216.

18. Edwards M., Madsen D., Stringham C., Margulis A., Wicks B., Long D. A small, robust LFM-CW SAR for operation on UAVs and small aircraft. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2008, pp. 514-517.

19. Meta A., de Wit J. J. M., Hoogeboom P. Development of a High Resolution Airborne Millimeter Wave FM-CW SAR. *European Radar Conference*, Amsterdam, 2004.

20. Tsunoda S. I., Pace F., Stence J., Woodring M. Lynx: A high-resolution synthetic aperture radar. *Sandia*, 03 December 2017. Available at: [http://www.sandia.gov/radar/files/spie\\_lynx.pdf](http://www.sandia.gov/radar/files/spie_lynx.pdf) (accessed 03 December 2017).

21. MiniSAR – Aerial detection and tracking of moving targets. *Metasensing*, 03 December 2017. Available at: <https://www.metasensing-group.com/minisar> (accessed 03 December 2017).

22. NuSAR: NRL UAV Synthetic Aperture Radar. *Space Dynamics Laboratory*, 03 December 2017. Available at: <http://www.spacedynamics.org/downloads/nusar.pdf> (accessed 03 December 2017).

23. Fransson J. E. S., Walter F., Ulander M. H. Estimation of Forest Parameters Using CARABAS-II VHF SAR Data. *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, 2000, vol. 38, no. 2, pp. 720-728.

24. Henke D., Barmettler A., Meier E. Bistatic Experiment With UWB-CARABAS Sensor – First Results and Prospects of Future Applications. Available

at: <https://pdfs.semanticscholar.org/652f/4fe4865257bdbbc774a0d07dc62d90356323.pdf> (accessed 03 December 2017).

25. The Unmanned Aerial Vehicle Synthetic Aperture Radar System. *PENTEK Setting the Standart Signal Processing*, 03 December 2017. Available at: [http://www.pentek.com/applications/17\\_1/RadarSystem.cfm](http://www.pentek.com/applications/17_1/RadarSystem.cfm) (accessed 03 December 2017).

26. Rizki Akbar P., Sumantyo J. T., Kuze H. CP-SAR UAV Development. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, 2010, vol. 38, part 8, pp. 203-208.

27. Monitoringovyi kompleks s bespilotnymi vertoletami BPV-500 [Monitoring complex with unmanned helicopters BPV-500]. *Radar MMC*, 03 December 2017. Available at: [http://www.radar-mms.com/Product.aspx?product\\_3\\_2](http://www.radar-mms.com/Product.aspx?product_3_2) (accessed 03 December 2017) (in Russian).

28. Vnotchenko S. L., Dostovalov M. Iu. Aviatsionnye mobil'nye malogabaritnye radiolokatory s sintezirovannoi aperturoi semeistva «Kompakt» (printsipy realizatsii i opyt primeneniia) [Aeronautical mobile compact synthetic aperture radar "Compact" family (the principles of the implementation and application of the experience)]. *Zhurnal radioelektroniki*, 2009, no. 10. Available at: <http://jre.cplire.ru/mac/oct09/5/text.html> (accessed 03 December 2017) (in Russian).

29. Malogabaritnaia bortovaia radiolokatsionnaia stantsiia dvojnogo naznacheniiia «Kogitor» (MF2) [The small-sized on-board radar station of dual purpose "Kogitor" (MF2)]. *Moscow Aviation Institute*, 03 December 2017. Available at: [https://mai.ru/science/results/dev/index.php?ELEMENT\\_ID=33319](https://mai.ru/science/results/dev/index.php?ELEMENT_ID=33319) (accessed 03 December 2017) (in Russian).

30. Likhachev V. P., Pashuk M. F. Mnogodiapazonnaia malogabaritnaia RLS s sintezirovannoi aperturoi anteny. Printsipy postroeniia i funktsionirovaniia, perspektivy [Multi-band small-sized radar with synthesized antenna aperture. Principles of construction and operation, prospects]. *Obmen opytom v oblasti sozdaniia sverkhshirokopolosnykh radioelektronnykh sistem: materialy VI obshcherossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Proceedings of the 6th All-Russian Scientific and Practical Conference "Exchange of experience in the field of creating ultra-wideband radio-electronic systems"]. Omsk, Omsky Gosudarstvenny Tekhnicheskyy Universitet, 2016, pp. 261-271 (in Russian).

31. Kanashchenkov A. I. Intellect dlia bespilotnika [Intelligence for the drones]. *Aviapanorama*, 2012, no. 4, pp. 11-13 (in Russian).

32. Kuznetsov V. A., Baranov M. M. Formirovanie chastotno-modulirovannykh signalov malogabaritnykh RSA [Formation of frequency-modulated signals of small SAR]. *Perspektivy razvitiia aviatsionnogo radioelektronnogo oborudovaniia: sbornik statey po materialam II Mezhvuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii kursantov i slushateley* [Proceedings of the 2nd All-Russian Conference "Molodezhnye chteniia pamiati Iu.A. Gagarina"]. Voronezh, Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy, 2015, pp. 156-162 (in Russian).

33. Kuznetsov V. A., Baranov M. M. Malogabaritnaia radiolokatsionnaia stantsiia s sintezirovannoi aperturoi anteny [The compact synthetic aperture radar].

*Molodezh' i budushchee aviatsii i kosmonavtiki: annotatsii rabot 7-i Mezhotraslevogo molodezhnogo konkursa nauchno-tekhnicheskikh rabot i proektov* [Youth and the future of aviation and cosmonautics: annotations of the works of the 7th Inter-branch Youth Competition of Scientific and Technical Works and Projects]. Moscow, Moscow Aviation Institute, 2015, pp. 155 (in Russian).

34. Kuznetsov V. A., Arestov E. Iu. Blok tsifrovoy obrabotki signalov RSA na PLIS Xilinx [The digital SAR signal processing block based on FPGA Xilinx]. *Akademicheskiye Zhukovskiye chteniya. Sovremennoye sostoyaniye i perspektivy razvitiya aviatsionnogo radioelektronnogo oborudovaniya: sbornik nauchnykh statey po materialam III Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proceedings of the 3th All-Russian Scientific and Practical Conference “Academic Zhukovsky readings. Current state and prospects for the development of aviation radio electronic equipment”]. Voronezh, Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy, 2016, pp. 27-31 (in Russian).

35. Kuznetsov V. A., Ovchinnikov K. A. Tsifrovoy soglasovannyi fil'tr RSA na PLIS Xilinx [Digital matched SAR filter of Xilinx FPGA]. *Akademicheskiye Zhukovskiye chteniya. Sovremennoye sostoyaniye i perspektivy razvitiya aviatsionnogo radioelektronnogo oborudovaniya: sbornik nauchnykh statey po materialam III Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proceedings of the 3th All-Russian Scientific and Practical Conference “Academic Zhukovsky readings. Current state and prospects for the development of aviation radio electronic equipment”]. Voronezh, Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy, 2016, pp. 221-225 (in Russian).

36. Kuznetsov V. A., Goncharov S. A. Struktura i elementnaia baza malogabaritnoi radiolokatsionnoi stantsii C-diapazona [The structure and element base of the small-scale C-band radar]. *Aviakosmicheskie tekhnologii: tezisy XVIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii i shkola molodykh uchenykh, aspirantov i studentov* [Abstracts of the 18th International Scientific and Practical Conference “Aerospace Technologies”]. Voronezh, Elist Publ., 2017, pp. 44-48 (in Russian).

37. Kuznetsov V. A., Goncharov S. A. Opyt i osnovnye rezul'taty razrabotki malogabaritnykh radiolokatorov dlia bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Experience and main results of development of small-size radars for unmanned aerial vehicles]. *Sovremennoe sostoianie i perspektivy razvitiia sistem svyazi i RTO v upravlenii aviatsiei: sbornik statey VI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy dnyu obrazovaniya voysk svyazi* [Proceedings of the 6th International Conference “Current state and prospects of the development of communication systems and radio engineering support in aviation management”]. Voronezh, Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy, 2017, pp. 136-140 (in Russian).

38. Kuznetsov V. A., Goncharov S. A. Radiolokatsionnaia stantsiia s sintezirovaniem apertury i nepreryvnym lineino chastotno-modulirovannym izlucheniem [Synthetic Aperture Radar with Continuous Linearly Frequency-

Modulated Radiation]. Patent Russia, no. RU 2016121055. Publish. 01.12.2017, bul. no. 34 (in Russian).

39. Meta A., Hoogeboom P., Ligthart L. P. Non-linear frequency scaling algorithm for FMCW SAR data. *Proc. 3rd Eur. Radar Conf*, 2006, pp. 9-12.

40. Moreira A., Huang Y. Airborne SAR processing of highly squinted data using a chirp scaling approach with integrated motion compensation. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens*, 1994, vol. 32, no. 5, pp. 1029-1040.

41. Kuznetsov V. A., Goncharov S. A. Algoritm avtofokusirovki radiolokatsionnogo izobrazheniia po entropii [The autofocusing radar image algorithm by entropy]. *Akademicheskie Zhukovskie chteniia. Sovremennoe sostoianie i perspektivy razvitiia aviatsionnogo radioelektronnoho oborudovaniia: sbornik nauchnykh statey po materialam IV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proceedings of the 4th All-Russian Conference “Academic Zhukovsky readings. Current state and prospects of development of aviation radio electronic equipment”]. Voronezh, Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy, 2017, pp. 127-131 (in Russian).

Статья поступила 06 декабря 2017 г.

### Информация об авторах

*Кузнецов Виктор Андреевич* – кандидат технических наук. Старший преподаватель кафедры эксплуатации бортового авиационного радиоэлектронного оборудования. ВУНЦ ВВС «ВВА имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж). Область научных интересов: системный анализ, радиолокация, распознавание образов. E-mail: kuzzvictor@mail.ru

*Гончаров Сергей Анатольевич* – курсант факультета авиационного радиоэлектронного оборудования. ВУНЦ ВВС «ВВА имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж). Область научных интересов: радиолокация. E-mail: sergius36you@gmail.com

Адрес: 394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54а.

---

## Structural-Parametric Synthesis of Short-Range Unmanned Aerial Vehicle Small-Sized SAR

V. A. Kuznetsov, S. A. Goncharov

**Purpose.** *One of the perspective direction for the development of unmanned aviation is the development of short-range unmanned aerial vehicles (UAV), used at high and medium altitudes with a long flight endurance. The UAV airborne sensors under difficult monitoring conditions are ineffective, which leads to the impossibility of ensuring continuity of monitoring. To exclude the dependence on the time of day and weather conditions, it is necessary to use the radar module of payload UAV. However, because of mass-size equipment characteristics and power consumption hard limitations for UAV, the location of existing synthetic aperture radars (SAR) is impossible, which makes the work relevant. Because of SAR development is interdisciplinary, the one possible way to solve this class problems is system analysis. When designing a universal radar module for short-range UAV, it is necessary to develop such a SAR construction scheme, which*

will provide the possibility of its technical implementation with minimal mass-size characteristics, and the maximum resolution should be achieved. The purpose of the work is to increase the share of Russian participation in the remote sensing radar data market by using a new radar sensor on the UAV with effective secondary trajectory signal processing under conditions of high a priori uncertainty. **Methods.** The problem solution of the small-size SAR developing is based on the structural synthesis of the scheme for constructing it using the minimax criterion "mass-size characteristics-resolution", while the radar image high resolution is achieved by using the resulting of parametric synthesis the quasioptimum radar image formation and autofocusing algorithms with minimal phase estimate error and minimal image entropy criteria. **Novelty.** The novel elements in this paper is the SAR optimal structure, which additionally includes a distance compensation filter, a control controller and an on-board microcomputer allowing to increase the signal-to-noise ratio of the signal reflected from targets at long ranges, to increase the modulation stability of the signal frequency with irregular modulation characteristic distortions of the linear frequency modulated (LFM) signal generator due to a change in the operating temperature and voltage range, and also to form a high resolution radar image directly on UAV board and remote control the modes of the SAR operations. **Results.** Using synthesized on the basis of the system approach and presented structure of small-size SAR and quasioptimal radar image formation and autofocusing algorithms, it is possible to realize a universal radar module for short-range UAV with a payload mass of up to 5 kg with the trajectory signal processing directly on board, which significantly reduces the consumer equipment cost. The proposed structural SAR scheme is implemented in digital and radio frequency printed circuit boards. The radio frequency part transmits the signal in the band of operating frequencies 5100-6000 MHz, receive and primary processing of the trajectory signal. The digital part is designed to form supply voltages and control the elements of the structural circuit. In the on-board microcomputer, a secondary processing of the received signal is carried out, including the radar image formation and autofocus with a resolution of up to 0.19 m. **Practical relevance.** The of presented solutions complex is proposed to be implemented in a universal short-range UAV radar module form that allows for real monitoring continuity and, ultimately, to take priority positions in the world remote sensing market in the radar data segment obtained with HALE / MALE type UAV.

**Key words:** remote sensing, system analysis, synthetic aperture radar, linear frequency-modulated signal, radar image, autofocus, unmanned aerial vehicle.

### Information about Authors

*Viktor Andreevich Kuznetsov* – Ph.D. of Engineering Sciences. Senior Lecturer of Department of Exploitation of Airborne Electronic Equipment. Federal State Official Military Educational Institution of Higher Education «Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh) the Ministry of Defence of the Russian Federation. Field of research: system analysis, radiolocation, pattern recognition. E-mail: kuzzvikt@mail.ru

*Sergey Anatolevich Goncharov* – Cadet. Faculty of Aviation Radioelectronic Equipment. Federal State Official Military Educational Institution of Higher Education «Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh) the Ministry of Defence of the Russian Federation. Field of research: radiolocation. E-mail: sergius36you@gmail.com

Address: Russia, 394064, Voronezh, Starykh Bolshevikov st, 54a.

УДК 004.2+66.021.4

## Подход к исследованию теплопроводности нечеткими численными методами в условиях неопределенности теплофизических характеристик

Бобков В. И., Борисов В. В., Дли М. И.

**Постановка задачи:** традиционный подход к решению большого класса задач исследования термически активируемых химико-энерготехнологических процессов не позволяет учесть присущую теплофизическим характеристикам этих процессов неопределенность. Использование же при решении дифференциальных уравнений математической физики нечетких численных методов приводит к проблеме возрастания неопределенности вследствие итерационных вычислений над нечеткими параметрами. Требуется предложить подход к исследованию термически активируемых химико-энерготехнологических процессов, обеспечивающий отсутствие накопления неопределенности при выполнении итерационных вычислений над нечеткими параметрами конечно-разностного уравнения теплопроводности. **Целью работы** является создание подхода к исследованию термически активируемых химико-энерготехнологических процессов нечеткими численными методами в условиях неопределенности теплофизических характеристик. **Используемые методы:** нечеткие численные методы, методы теории нечетких множеств и вычислений. **Новизна:** предлагается оригинальный подход к исследованию термически активируемых химико-энерготехнологических процессов нечеткими численными методами в условиях неопределенности теплофизических характеристик, позволяющий решить проблему возрастания неопределенности результатов при итерационных вычислениях на основе модального взаимодействия параметров, представленных нечеткими числами. **Результат:** предлагаемый подход использован для исследования распределения температуры сферических окатышей в условиях неопределенности теплофизических характеристик. Описана процедура реализации операций над нечеткими параметрами конечно-разностного уравнения теплопроводности с использованием нечеткого интервального метода и предлагаемого подхода. **Практическая значимость:** предложенный в статье подход и полученные на его основе соотношения позволяют исследовать сложные динамические процессы нагрева окатышей, учитывающие эндо- и экзотермические эффекты физико-химических превращений, параметры тепло- и массопереноса и кинетики гетерогенных процессов в условиях неопределенности.

**Ключевые слова:** теплотехнологическая система, теплофизические характеристики, нечеткие численные методы, окатыши, теплопроводность, теплоемкость.

### Актуальность

Существует большой класс задач исследования термически активируемых химико-энерготехнологических процессов, целью которых является определение оптимальных режимов работы теплотехнологических систем и способов воздействия на термически активируемые процессы с целью повышения их эффективности [1]. Исследование термически активируемых химико-

---

#### Библиографическая ссылка на статью:

Бобков В. И., Борисов В. В., Дли М. И. Подход к исследованию теплопроводности нечеткими численными методами в условиях неопределенности теплофизических характеристик // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 3. С. 73-83. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-03/03-Bobkov.pdf>

#### Reference for citation:

Bobkov V. I., Borisov V. V., Dli M. I. Approach to a Heat Conductivity Research by Fuzzy Numerical Methods in the Conditions of Indeterminacy Thermal Characteristics. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 3, pp. 73-83. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-03/03-Bobkov.pdf> (in Russian).

энерготехнологических процессов является сложной, многофакторной и дорогостоящей задачей, требует подробного изучения закономерностей физико-химических превращений и тепло-массообменных характеристик сырьевых материалов, продуктов и промежуточных компонентов, участвующих во всех стадиях технологического процесса подготовки окатышей [2-6]. Именно поэтому предпочтение при выполнении таких исследований отдается математическому моделированию процессов и аппаратов, теплотехнологических систем в целом [7].

Для математического описания и исследования химико-энерготехнологических процессов, как правило, используются системы дифференциальных уравнений, решение которых реализуется численными методами. Однако такой подход не позволяет учесть присущую теплофизическим характеристикам этих процессов неопределенность. Поэтому актуальной научной задачей является исследование этих процессов нечеткими численными методами.

Вместе с тем, итерационные вычисления над нечеткими параметрами конечно-разностных уравнений приводят к проблеме возрастания (накопления) неопределенности и к «размыванию» результатов, вследствие чего они оказываются сложно интерпретируемыми и непригодными для дальнейшего анализа.

В статье предлагается подход к решению дифференциальных уравнений математической физики в условиях неопределенности параметров с использованием нечетких численных методов, позволяющий решить проблему возрастания неопределенности при итерационных вычислениях на основе модального взаимодействия нечетких чисел.

Приведен пример использования предлагаемого подхода к исследованию распределения температуры сферических окатышей в условиях неопределенности теплофизических характеристик. Описана процедура реализации операций над нечеткими параметрами конечно-разностного уравнения теплопроводности с использованием нечеткого интервального метода и решением проблемы возрастания неопределенности при выполнении итерационных вычислений над этими параметрами на основе модального взаимодействия между нечеткими числами.

### Постановка задачи. Описание модели с нечеткими параметрами

Для содержательной постановки и решения задачи в работе введены обозначения, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Обозначения

Обозначение	Физический смысл обозначения
$\lambda$	– теплопроводность, Вт/(м·К)
$\rho c$	– объемная теплоемкость, Дж/(м <sup>3</sup> ·К)
$T_m$	– температура материала окатыша, К
$T_g$	– температура греющего газа-теплоносителя, К
$\alpha_F$	– коэффициент теплоотдачи с поверхности, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)
$\tau$	– время, с
$R$	– радиус окатыша, м

Обозначение	Физический смысл обозначения
$x$	– координата радиуса окатыша
$T_{m0}$	– начальная температура материала окатыша, К
$\Sigma q$	– сумма истоков и стоков теплоты в результате эндо- и экзотермических превращений в материале окатыша, Дж
$\Delta\tau$	– шаг разбиения по времени, с
$\Delta x$	– шаг разбиения по координате радиуса окатыша, м

Рассмотрим содержательную постановку задачи исследования химико-энерготехнологических процессов на примере типовой задачи исследования распределения температуры сферических окатышей в условиях неопределенности теплофизических характеристик.

На всех этапах подготовки и переработки фосфатного сырья по термической технологии целевые химико-энерготехнологические процессы: сушка, дегидратация, диссоциация карбонатов, спекание, восстановление и возгонка фосфора осуществляется путем регламентного теплового воздействия на исходный материал [8, 9]. Нагрев сырья происходит в результате высокоинтенсивного теплообмена с продуктами сгорания топлива или реакционными газами, фильтрующимися через плотный слой сырых окатышей [10]. Поскольку целевые процессы носят термически активируемый характер, их интенсивность находится в прямой зависимости от условий внешнего и внутреннего теплообмена, которые в свою очередь, определяются теплофизическими характеристиками обрабатываемых материалов [11]. Существенное влияние теплофизических характеристик фосфатного сырья на ход и эффективность процесса обжига в движущейся многослойной массе на конвейере обжиговой машины с перекрестной подачей греющего газа-теплоносителя отмечалось в работе [8].

Основным механизмом переноса тепла в материале окатышей является их теплопроводность [6]. Однако сложная изменяющаяся в процессе нагрева структура, гамма физико-химических превращений, сопровождающихся эндо- и экзотермическими эффектами, взаимопределяющий характер зависимостей, параметров тепло- и массопереноса и кинетики гетерогенных процессов не позволяют однозначно охарактеризовать параметры теплопроводности и объемной теплоемкости. Экспериментальные исследования, для различных фосфоритовых руд и пород, а также прессовок и окатышей, показывают, что для температур обжига теплопроводность  $\lambda$  находится в диапазоне  $\lambda \in [1; 5]$ , а объемная теплоемкость  $\rho c \cdot 10^{-6}$  – в диапазоне  $\rho c \in [2; 3,5]$ . При этом по результатам этих исследований можно определить дополнительное свойство этих параметров – степень их значений принадлежности к указанным диапазонам.

Представим каждый из этих параметров в виде нечетких чисел  $\tilde{\lambda}$ ,  $\rho c$ , соответственно:

- $\tilde{\lambda}$ , заданное в диапазоне  $[1; 5]$ , представляет собой совокупность упорядоченных пар  $\tilde{\lambda} = \{(\mu_{\tilde{\lambda}}^*(\lambda), \lambda)\}$ , где степень принадлежности  $\mu_{\tilde{\lambda}}^*(\lambda) \forall \lambda \in [1; 5]$  к множеству  $\tilde{\lambda}$  задается с использованием функции принад-

лежности  $\mu_{\tilde{\lambda}}(\lambda)$ , отображающей каждый элемент  $\lambda$  на диапазон действительных чисел  $[0; 1]$ ;

- $\rho c$ , заданное в диапазоне  $[2; 3,5]$ , представляет собой совокупность упорядоченных пар  $\rho c = \{(\mu_{\rho c}^*(\rho c), \rho c)\}$ , где степень принадлежности  $\mu_{\rho c}^*(x) \forall \rho c \in [2; 3,5]$  к множеству  $\rho c$  задается с использованием функции принадлежности  $\mu_{\rho c}(x)$ , отображающей каждый элемент  $\rho c$  на диапазон действительных чисел  $[0; 1]$ ;

На рис. 1 показаны примеры нечетких параметров теплопроводности и объемной теплоёмкости в виде треугольных нечетких чисел  $\tilde{\lambda}$  и  $\rho c$ , соответственно.

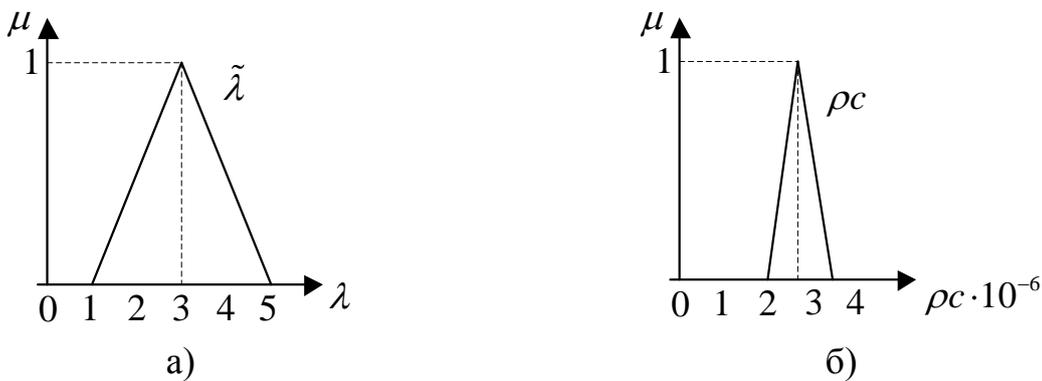


Рис. 1. Нечеткие параметры теплопроводности (а) и объемной теплоёмкости (б) в виде нечетких треугольных чисел

Математическое описание тепловых процессов в окатыше базируется на системе дифференциальных уравнений с нечеткими параметрами  $\rho c$  и  $\tilde{\lambda}$ :

$$\rho c \frac{\partial T_m}{\partial \tau} = \frac{1}{x^2} \frac{\partial}{\partial x} \left( \tilde{\lambda} x^2 \frac{\partial T_m}{\partial x} \right) - \sum_l q_l \quad (1)$$

при начальных и граничных условиях:

$$\tau = 0, \quad T_m = T_{m_0}; \quad (2)$$

$$x = 0, \quad \frac{\partial T_m}{\partial x} = 0; \quad (3)$$

$$x = R, \quad -\lambda \left( \frac{\partial T_m}{\partial x} \right) = \alpha_F (T_g - T_m)_{x=R}. \quad (4)$$

### Решение с использованием нечетких численных методов

Решение поставленной задачи реализуется нечеткими численными методами. Конечно-разностное представление уравнения (1) проводится по равномерной сетке с числом разбиений по радиусу окатышей  $N$  и по времени  $K$ .

$$\rho c_i^k \frac{T_{m_i}^k - T_{m_i}^{k-1}}{\Delta \tau} = \frac{1}{x_i^2} \frac{1}{\Delta x^2} \left( x_{(i+1)/2}^2 \tilde{\lambda}_{(i+1)/2, j}^k (T_{m_{i+1}}^k - T_{m_i}^k) - x_{(i-1)/2}^2 \tilde{\lambda}_{(i-1)/2}^k (T_{m_i}^k - T_{m_{i-1}}^k) \right) + q_{\Sigma i}^k,$$

где

$$\tilde{\lambda}_{(i+1)/2} = \frac{\tilde{\lambda}_{i+1} + \tilde{\lambda}_i}{2}, \quad \tilde{\lambda}_{(i-1)/2} = \frac{\tilde{\lambda}_i + \tilde{\lambda}_{i-1}}{2}, \quad q_{\Sigma} = \sum_l q_l. \quad (5)$$

Конечно-разностное уравнение теплопроводности (5) записано в неявной форме и для решения используется метод прогонки. Расчетные соотношения для решения внутренней задачи теплопроводности в окатыше, опустив для наглядности индексы  $k$  на каждом временном «слое»  $\Delta\tau$ , запишутся в стандартной форме:

$$\tilde{A}_i \tilde{C}_{i-1} - \tilde{C}_i \tilde{T}_i + \tilde{B}_i \tilde{T}_{i+1} = \tilde{D}_i, \quad i = 2, \dots, N-1,$$

где

$$\tilde{A}_i = \frac{\Delta\tau}{\Delta x^2} x_{(i-1)/2}^2 \tilde{\lambda}_{(i-1)/2},$$

$$\tilde{C}_i = \frac{\Delta\tau}{\Delta x^2} \left( x_{(i+1)/2}^2 \tilde{\lambda}_{(i+1)/2} + x_{(i-1)/2}^2 \tilde{\lambda}_{(i-1)/2} \right) + x_i^2 \rho c_i,$$

$$\tilde{B}_i = \frac{\Delta\tau}{\Delta x^2} x_{(i+1)/2}^2 \tilde{\lambda}_{(i+1)/2},$$

$$\tilde{D}_i = x_i^2 \left( \rho c_i T_{mi} + \Delta\tau q_{\Sigma i} \right).$$

Решение ищется методом прогонки с использованием рекуррентного соотношения

$$\tilde{T}_i = \tilde{\beta}_{i+1} \tilde{T}_{i+1} + \tilde{\gamma}_{i+1}, \quad i = 2, \dots, N,$$

Для прогоночных коэффициентов  $\tilde{\beta}_{i+1}$  и  $\tilde{\gamma}_{i+1}$  справедливы зависимости

$$\tilde{\beta}_{i+1} = \frac{\tilde{B}_i}{\tilde{C}_i - \tilde{A}_i \tilde{\beta}_i}, \quad \tilde{\gamma}_{i+1} = \frac{\tilde{A}_i \tilde{\gamma}_i + \tilde{D}_i}{\tilde{C}_i - \tilde{A}_i \tilde{\beta}_i}, \quad i = 2, \dots, N-1.$$

С учетом граничных условий (4) определяются нечеткие значения коэффициентов  $\tilde{\beta}_1, \tilde{\gamma}_1$  и температуры на правой границе (поверхности окатыша)  $T_{N+1}$ .

Полученные соотношения позволяют решить внутреннюю задачу теплопроводности в условиях неопределенности теплофизических характеристик и описать нечеткое распределение температуры сферических окатышей нечеткими численными методами.

### Выполнение нечетких операций над нечеткими параметрами

Для реализации операций над нечеткими параметрами конечно-разностного уравнения теплопроводности используем нечеткий интервальный метод [12].

Пусть в качестве примера заданы входные параметры в виде нечетких треугольных чисел  $\tilde{A} = (a_1, M(\tilde{A}), a_3)$  и  $\tilde{B} = (b_1, M(\tilde{B}), b_3)$  и нечеткое число  $\tilde{C} = (c_1, M(\tilde{C}), c_3)$ , являющееся результатом некоторой операции  $\tilde{*}$  над  $\tilde{A}$  и  $\tilde{B}$ . Здесь  $a_1, b_1, c_1$  – левые границы,  $M(\tilde{A}), M(\tilde{B}), M(\tilde{C})$  – модальные значения и  $a_3, b_3, c_3$  – правые границы нечетких чисел  $\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}$ , соответственно.

Тогда процедура выполнения некоторой операции  $\tilde{*}$  над нечеткими треугольными числами  $\tilde{A}$  и  $\tilde{B}$  на основе интервального метода заключается в следующем.

*Этап 1.* Декомпозиция входных параметров  $\tilde{A}$  и  $\tilde{B}$  на  $\alpha$ -уровни  $A_\alpha = [a_1^{(\alpha)}, a_3^{(\alpha)}]$  и  $B_\alpha = [b_1^{(\alpha)}, b_3^{(\alpha)}]$ . Критерий выбора  $\alpha$ -уровней – требуемая точность результата.

*Этап 2.* Для каждого интервала  $\alpha$ -уровня выполняется соответствующая интервальная операция:  $C_\alpha = A_\alpha * B_\alpha$ ,  $C_\alpha = [c_1^{(\alpha)}, c_3^{(\alpha)}]$ .

*Этап 3.* Выполняется композиция результата операции над нечеткими числами из его  $\alpha$ -уровней:  $\tilde{C} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} \alpha C_\alpha$ .

### Ограничение возрастания неопределенности результатов при итерационных вычислениях на основе модального взаимодействия нечетких чисел

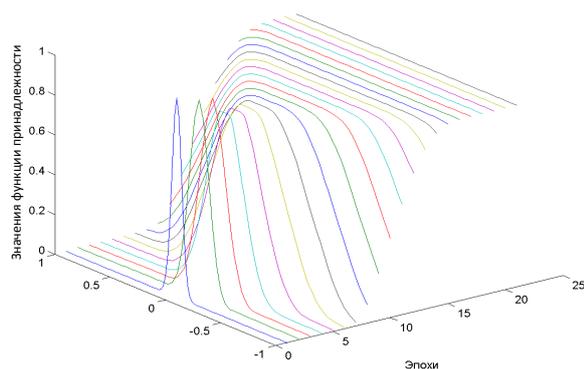
При наличии итерационных вычислений над нечеткими параметрами конечно-разностного уравнения теплопроводности требуется решить проблему «размывания» результата, вследствие чего он может оказаться сложно интерпретируемым и непригодным для дальнейшего анализа. В качестве одного из наиболее эффективных способов ограничения возрастания (накопления) нечеткости воспользуемся способом, предложенным в [13], заключающимся в использовании так называемого модального взаимодействия нечетких чисел.

В результате модифицированные (с учетом модального взаимодействия) операции над интервалами  $\alpha$ -уровней нечетких чисел  $\tilde{A}$  и  $\tilde{B}$  вычисляются в соответствии со следующими выражениями:

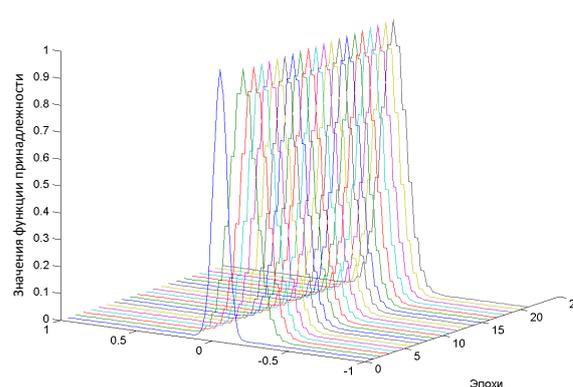
$$\begin{aligned} C_\alpha &= A_\alpha + B_\alpha = [c_1^{(\alpha)}, c_3^{(\alpha)}] = \\ &= \left[ \min(a_1^{(\alpha)} + M(\tilde{B}), b_1^{(\alpha)} + M(\tilde{A})), \max(a_3^{(\alpha)} + M(\tilde{B}), b_3^{(\alpha)} + M(\tilde{A})) \right], \\ C_\alpha &= A_\alpha - B_\alpha = [c_1^{(\alpha)}, c_3^{(\alpha)}] = \\ &= \left[ \min(a_1^{(\alpha)} - M(\tilde{B}), -b_3^{(\alpha)} + M(\tilde{A})), \max(a_3^{(\alpha)} - M(\tilde{B}), -b_1^{(\alpha)} + M(\tilde{A})) \right], \\ C_\alpha &= A_\alpha \cdot B_\alpha = [c_1^{(\alpha)}, c_3^{(\alpha)}] = \\ &= \left[ \min(a_1^{(\alpha)} \cdot M(\tilde{B}), a_3^{(\alpha)} \cdot M(\tilde{B}), M(\tilde{A}) \cdot b_1^{(\alpha)}, M(\tilde{A}) \cdot b_3^{(\alpha)}), \right. \\ &\quad \left. \max(a_1^{(\alpha)} \cdot M(\tilde{B}), a_3^{(\alpha)} \cdot M(\tilde{B}), M(\tilde{A}) \cdot b_1^{(\alpha)}, M(\tilde{A}) \cdot b_3^{(\alpha)}) \right], \\ C_\alpha &= \frac{A_\alpha}{B_\alpha} = [c_1^{(\alpha)}, c_3^{(\alpha)}] = \\ &= \left[ \min\left(\frac{a_1^{(\alpha)}}{M(\tilde{B})}, \frac{a_3^{(\alpha)}}{M(\tilde{B})}, \frac{M(\tilde{A})}{b_1^{(\alpha)}}, \frac{M(\tilde{A})}{b_3^{(\alpha)}}\right), \max\left(\frac{a_1^{(\alpha)}}{M(\tilde{B})}, \frac{a_3^{(\alpha)}}{M(\tilde{B})}, \frac{M(\tilde{A})}{b_1^{(\alpha)}}, \frac{M(\tilde{A})}{b_3^{(\alpha)}}\right) \right]. \end{aligned}$$

Примечание. Если в качестве операнда используется четкое число, то для такого числа (чисел) левая и правая границы приравняются к его модальному значению.

На рис. 2, а проиллюстрирован эффект возрастания неопределенности результата итерационных вычислений над нечеткими параметрами без использования модального взаимодействия между нечеткими числами, а на рис. 2, б – отсутствие накопления нечеткости при использовании модального взаимодействия между нечеткими числами.



а)



б)

Рис. 2. Результаты итерационных вычислений без модального взаимодействия нечетких чисел (а) и с модальным взаимодействием нечетких чисел (б)

### Заключение

В статье предлагается оригинальный подход к исследованию термически активируемых химико-энерготехнологических процессов нечеткими численными методами в условиях неопределенности теплофизических характеристик, позволяющий решить проблему возрастания неопределенности результатов при итерационных вычислениях на основе модального взаимодействия параметров, представленных нечеткими числами.

Приведен пример использования предлагаемого подхода к исследованию распределения температуры сферических окатышей в условиях неопределенности теплофизических характеристик. Описана процедура реализации операций над нечеткими параметрами конечно-разностного уравнения теплопроводности с использованием нечеткого интервального метода и предлагаемого подхода.

Полученные соотношения позволяют решить внутреннюю задачу теплопроводности в условиях неопределенности теплофизических характеристик и описать нечеткое распределение температуры сферических окатышей нечеткими численными методами.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 17-01-00189\_a.

## Литература

1. Леонтьев Л. И. Физико-химические особенности комплексной переработки железо-содержащих руд и техногенных отходов // В книге: XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии Тезисы докладов в 5 томах. Уральское отделение Российской академии наук. – Екатеринбург. 2016. – С. 92.
2. Юсфин Ю. С., Пашков Н. Ф., Антоненко Л. К., Жак Р. М., Майзель Г. М., Базилевич Т. Н. Интенсификация производства и улучшение качества окатышей. – М.: Металлургия, 1994. – 240 с.
3. Luis P., Van der Bruggen B. Exergy analysis of energy-intensive production processes: advancing towards a sustainable chemical industry // Journal of Chemical Technology and Biotechnology. 2014. Vol 89. № 9. pp. 1288-1291.
4. Elgharbi S., Horchani-Naifer K., Férid M. Investigation of the structural and mineralogical changes of Tunisian phosphorite during calcinations // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2015. Vol. 119. № 1. pp. 265-269.
5. Bobkov V. I., Borisov V. V., Dli M. I., Meshalkin V. P. Multicriterial optimization of the energy efficiency of the thermal preparation of raw materials // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2015. Vol. 49. № 6. pp. 842-846.
6. Bobkov V. I., Borisov V. V., Dli M. I., Meshalkin V. P. Modeling the calcination of phosphorite pellets in a dense bed // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2015. Vol. 49. № 2. pp. 176-182.
7. Rudobashta S. P. Calculation of the kinetics of drying disperse materials on the basis of analytical methods // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2010. Vol. 83. № 4. pp. 753-759.
8. Бобков В. И. Моделирование технологических процессов при термической подготовке дисперсного фосфатного сырья // Химическая технология. 2016. № 6. – С. 263–271.
9. Panchenko S. V., Shirokikh T. V. Thermal Hydraulics of moving dispersive layer of process units // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2016. Vol. 50. № 2. pp. 217-224.
10. Panchenko S. V., Shirokikh T. V. Thermophysical processes in burden zone of submerged arc furnaces // Theoretical Foundation of Chemical Engineering. 2014. Vol. 48. № 1. pp. 77-81.
11. Meshalkin V. P., Men'shikov V. V., Panchenko S. V., Panchenko D. S., Kazak A. S. Computer-aided simulation of heat- and mass-transfer processes in an ore reduction electrothermal reactor // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2015. V.49. № 5. pp. 55-60.
12. Борисов В. В., Федулов А. С., Зернов М. М. Основы нечеткого логического вывода. Серия «Основы нечеткой математики». Книга 4. Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия–Телеком, 2014. – 122 с.
13. Федулов А. С. Вид взаимодействия нечетких чисел, ограничивающий возрастание неопределенности при выполнении операций нечеткой арифметики // Вестник Московского энергетического института. 2006. № 1. – С. 101–109.

## References

1. Leont'ev L. I. Physical and chemical features of the complex processing of iron-stones and technogenic wastes. *V knige: XX Mendeleevskii s"ezd po obshchei i prikladnoi khimii Tezisy dokladov v 5 tomakh. Ural'skoe otdelenie Rossiiskoi akademii nauk* [XX Mendeleev congress on general and applied chemical]. Ekaterinburg, 2016, p. 92 (in Russian).
2. Iusfin Iu. S., Pashkov N. F., Antonenko L. K., Zhak R. M., Maizel' G. M., Bazilevich T. N. *Intensifikatsiia proizvodstva i uluchshenie kachestva okatyshei* [Intensification of production and improvement of quality of pellets]. Moscow, Metallurgii, 1994. 240 p. (in Russian).
3. Luis P., Van der Bruggen B. Exergy analysis of energy-intensive production processes: advancing towards a sustainable chemical industry. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2014, vol. 89, no. 9. pp. 1288-1291.
4. Elgharbi S., Horchani-Naifer K., Férid M. Investigation of the structural and mineralogical changes of Tunisian phosphorite during calcinations. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2015, vol. 119, no. 1, pp. 265-269.
5. Bobkov V. I., Borisov V. V., Dli M. I., Meshalkin V. P. Multicriterial optimization of the energy efficiency of the thermal preparation of raw materials. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2015, vol. 49, no. 6, pp. 842-846.
6. Bobkov V. I., Borisov V. V., Dli M. I., Meshalkin V. P. Modeling the calcination of phosphorite pellets in a dense bed. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2015, vol. 49, №2, pp.176-182.
7. Rudobashta S. P. Calculation of the kinetics of drying disperse materials on the basis of analytical methods. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2010, vol. 83, no. 4, pp. 753-759.
8. Bobkov V. I. Modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov pri termicheskoi podgotovke dispersnogo fosfatnogo syr'ia [Design of technological processes at thermal preparation of dispersible phosphatic raw material]. *Chemical Engineering*, 2016, no. 6, pp. 263-271 (in Russian).
9. Panchenko S.V., Shirokikh T.V. Thermal Hydraulics of moving dispersive layer of process units. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2016, vol. 50, no. 2, pp. 217-224.
10. Panchenko S. V., Shirokikh T. V. Thermophysical processes in burden zone of submerged arc furnaces. *Theoretical Foundation of Chemical Engineering*, 2014, vol. 48, no. 1. pp. 77-81.
11. Meshalkin V. P., Men'shikov V. V., Panchenko S. V., Panchenko D. S., Kazak A. S. Computer-aided simulation of heat- and mass-transfer processes in an ore-reduction electrothermal reactor. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2015, vol. 49, no. 5, pp. 55-60.
12. Borisov V. V., Fedulov A. S., Zernov M. M. *Osnovy nechetkogo logicheskogo vyvoda. Seriya «Osnovy nechetkoi matematiki». Kniga 4. Uchebnoe posobie dlia vuzov* [Bases of unclear inferencing. Series of "Basis of unclear mathematics". Book 4. Train aid for institutions of higher learning]. Moscow, Goriachaia liniia–Telekom Publ., 2014. – 122 p. (in Russian).

13. Fedulov A. S. Vid vzaimodeistviia nechetkikh chisel, ogranichivaiushchii voзрастanie neopredelennosti pri vypolnenii operatsii nechetkoi arifmetiki [Type of cooperation of unclear numbers, limiting growth of vagueness at implementation of operations of unclear arithmetic]. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta*. 2006, no. 1, pp. 101-109 (in Russian).

Статья поступила 06 декабря 2017 г.

### Информация об авторах

*Бобков Владимир Иванович* – кандидат технических наук. Доцент кафедры высшей математики. Национальный исследовательский университет «МЭИ» (филиал в г. Смоленске). Области научных интересов: системный анализ сложных теплотехнологических систем; оптимизация теплотехнологических процессов; математическое моделирование; интеллектуальная поддержка принятия решений; интеллектуальный анализ данных. E-mail: vovabobkoff@mail.ru

*Борисов Вадим Владимирович* – доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры вычислительной техники. Национальный исследовательский университет «МЭИ» (филиал в г. Смоленске). Старший научный сотрудник научно-исследовательского центра. Военная академия войсковой противовоздушной обороны Вооруженных сил Российской Федерации им. А.М. Василевского. Области научных интересов: нечеткий и нейро-нечеткий анализ, моделирование сложных систем и процессов; интеллектуальная поддержка принятия решений; ассоциативные системы хранения и обработки информации. E-mail: vbor67@mail.ru

*Дли Максим Иосифович* – доктор технических наук, профессор. Заместитель директора по научной работе. Национальный исследовательский университет «МЭИ» (филиал в г. Смоленске). Области научных интересов: нечеткий когнитивный анализ и моделирование сложных систем и процессов; интеллектуальная поддержка принятия решений. E-mail: midli@mail.ru

Адрес: 214013, Россия, г. Смоленск, Энергетический проезд, д. 1.

---

## Approach to a Heat Conductivity Research by Fuzzy Numerical Methods in the Conditions of Indeterminacy Thermal Characteristics

V. I. Bobkov, V. V. Borisov, M. I. Dli

**Problem definition:** traditional approach to the solution of a big class of research problems of thermally activated chemical and power technological processes does not allow to consider indeterminacy inherent in thermal characteristics of these processes. Use at the solution of differential equations of mathematical physics of fuzzy numerical methods leads to a problem of increase of indeterminacy owing to iterative calculations over indistinct parameters. It is required to offer the approach to a research of thermally activated chemical and power technological processes providing lack of accumulation of indeterminacy when performing iterative calculations over fuzzy parameters of a finite-difference heat conduction equation. The purpose of work is creation of approach to a research of thermally activated chemical and power technological processes by fuzzy numerical methods in the conditions of indeterminacy of thermal characteris-

*tics. The used methods: fuzzy numerical methods, methods of the theory of fuzzy sets and calculations. Novelty: the original approach to a research of thermally activated chemical and power technological processes by fuzzy numerical methods in the conditions of indeterminacy of thermal characteristics allowing to solve a problem of increase of indeterminacy of results at iterative calculations on the basis of modal interaction of the parameters presented by fuzzy numbers is offered. Result: the offered approach is used for a research of distribution of temperature of spherical pellets in the conditions of indeterminacy of thermal characteristics. The procedure of realization of operations over fuzzy parameters of a finite-difference heat conduction equation with use of an fuzzy interval method and the offered approach is described. Practical significance: the approach offered in article and the ratios received on its basis allow to investigate the complex dynamic processes of heating of pellets considering endo- and exotherms of physical and chemical transformations, parameters warm and a mass transfer and a kinetics of heterogeneous processes in the conditions of indeterminacy.*

**Keywords:** heat-engineering system, physical and heat characteristics, fuzzy numerical methods, pellets, thermal conductivity, heat capacity.

### Information about Authors

*Vladimir Ivanovich Bobkov* – Ph.D. of Engineering Sciences. Associate Professor of the Department of Computer Engineering. The Branch of National Research University “Moscow Power Engineering Institute” in Smolensk. Fields of research: system analysis of complex heat engineering systems; optimization of heat engineering processes; math modeling; intellectual decision-making support; high-performance data processing. E-mail: vovabobkoff@mail.ru

*Vadim Vladimirovich Borisov* – Dr. habil. of Engineering Sciences, Professor. Professor of the Department of Computer Engineering. The Branch of National Research University “Moscow Power Engineering Institute” in Smolensk. Senior researcher. Military Academy of Army Air Defence A.M. Vasilevsky. Fields of research: fuzzy and fuzzy neural models and networks, intellectual decision-making support, associative memory, associative systems of storage and processing of the information and knowledge. E-mail: vbor67@mail.ru

*Maxim Iosifovich Dli* – Dr. habil. of Engineering Sciences, Professor. Head of the Department of Science. The Branch of National Research University “Moscow Power Engineering Institute” in Smolensk. Fields of research: fuzzy cognitive analysis and modeling of complex systems and processes; digital signal processing; intellectual decision-making. E-mail: midli@mail.ru

Address: Russia, 214013, Smolensk, Energeticheskiy proezd, 1.

УДК 519.711

## Логические методы расчета надежности систем. Часть II. Математическая модель надежности

Левин В. И.

**Актуальность.** В последние годы все большее внимание ученых и проектировщиков технических систем приобретают вопросы совершенствования методов оценки надежности и безопасности этих систем, в связи с задачами повышения значений этих характеристик. **Цель статьи** заключается в разработке автоматически-логической модели надежности технических систем и соответствующих логических методов оценки надежности таких систем, которые в отличие от известных используют не традиционные – вероятностные показатели надежности, а детерминированные логические показатели. **Метод.** Для достижения поставленной цели в статье предложено использовать в качестве исходных данных наблюдаемые моменты последовательных отказов и восстановлений элементов технической системы, а в качестве характеристик надежности самой системы – моменты последовательных отказов и восстановлений этой системы. В этом случае задача оценки надежности системы сводится к построению ее математической модели в виде автоматных логических функций, выражающих моменты ее последовательных отказов и восстановлений через аналогичные моменты всех ее элементов. Данная статья представляет собой вторую часть работы, в которой детально разрабатывается автоматически-логическая модель, предназначенная для вычисления логической функции надежности технических систем. **Новизна работы** заключается в построении адекватной логической модели надежности системы, позволяющей свести оценку надежности технической системы к вычислению ее логических функций надежности. **Результат.** В статье детально разработаны логическая модель надежности и методы ее исследования, позволяющие вводить новые показатели надежности технических систем, не требующие для своей оценки использования вероятностных методов и исходных статистических данных об отказах элементов. На основе разработанной логической модели надежности и методах ее исследования решена задача построения автоматной модели надежности систем, которая позволит вести практические расчеты надежности реальных технических систем методами теории динамических автоматов.

**Ключевые слова:** переключательный процесс, надежность процесс, динамический автомат, двоичный оператор, структура оператора, логическая теория надежности.

### Введение

В первой части работы [1] было показано, что традиционные вероятностные расчеты надежности различных систем [2–5] по своей природе не элементарны и потому применительно к сложным системам достаточно трудоемки. В связи с этим была высказана идея разработки методов расчета надежности систем, в которых оперируют элементарными (первичными) величинами, характеризующими надежность системы и ее элементов, и устанавливают связь между ними. В развитие этой идеи в первой части работы [1] был описан математический аппарат новой теории и новых методов расчета надежности систем, основанный на математической логике [6, 7]. В этой статье, являющейся второй частью работы, строится и детально описывается автоматная математическая модель для оценки надежности систем.

#### Библиографическая ссылка на статью:

Левин В. И. Логические методы расчета надежности систем. Часть II. Математическая модель надежности // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 3. С. 84-97. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-03/04-Levin.pdf>

#### Reference for citation:

Levin V. I. Logical Methods of Computing of Systems Reliability. Part II. Mathematical Model of Reliability. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 3, pp. 84-97. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-03/04-Levin.pdf> (in Russian).

Эта модель, в сочетании с разработанным ранее логико-математическим аппаратом [1], позволяет проводить конструктивные расчеты надежности различных систем.

### 1. Переключательные процессы

Рассмотрим произвольную двоичную функцию непрерывного времени  $t$ , генерируемую в некоторой системе (в частности, технической системе), т. е. функцию  $x = x(t)$ , значения которой принадлежат множеству  $\{0,1\}$ . Пусть эта функция удовлетворяет трем условиям:

- 1) значение функции  $x$  в момент ее изменения  $t = a$  по определению совпадает со значением  $x$  при  $t > a$ ;
- 2) значения  $x$  определены на интервале времени  $(-\infty, \infty)$ ;
- 3) на любом конечном подынтервале указанного интервала имеется конечное число изменений значения функции. Введенная функция называется *переключательным процессом* в системе.

Обозначим:  $1$  – постоянный процесс, равный единице на некотором интервале времени;  $0$  – постоянный процесс, равный нулю на некотором интервале времени;  $1'$  – изменение значения процесса  $0 \rightarrow 1$ ;  $0'$  – изменение значения процесса  $1 \rightarrow 0$ ;  $0'_a$  – изменение  $0'$  в момент  $a$ ;  $1'_a$  – изменение  $1'$  в момент  $a$ ;  $1(a, b)$  – импульс  $1'_a 0'_b$ ;  $0(a, b)$  – пауза  $0'_a 1'_b$ . По условию 1 в некоторой окрестности момента  $a$  изменения значения процесса

$$1'_a = \begin{cases} 0, & t < a; \\ 1, & t \geq a; \end{cases} \quad 0'_a = \begin{cases} 1, & t < a; \\ 0, & t \geq a. \end{cases} \quad (1)$$

Согласно (1) *импульс* – это интервал единичных значений процесса, включающий начало и не включающий конец, а *пауза* – интервал нулевых значений процесса с аналогичными включениями:

$$1(a, b) = \begin{cases} 1, & a \leq t < b; \\ 0, & t < a \text{ или } t \geq b; \end{cases} \quad 0(a, b) = \begin{cases} 0, & a \leq t < b; \\ 1, & t < a \text{ или } t \geq b. \end{cases} \quad (2)$$

Формулы (2) при  $a = b$  принимают вид:

$$1(a, a) \equiv 0; \quad 0(a, a) \equiv 1. \quad (3)$$

Видим, что импульс (пауза) с совмещенными началом и концом фактически есть отсутствие импульса (паузы), т. е. вырожденный участок, и может быть исключен из рассмотрения. Однако из формулы (3) следует возможность формально рассматривать отсутствие импульса (паузы), т. е. тождественный  $0$  (тождественную  $1$ ), как импульс (паузу) с совмещенными началом и концом, что часто бывает полезно. Отметим также возможность рассматривать изменения процесса (1) как импульс (паузу) на бесконечном интервале:

$$1'_a = 1(a, \infty) = 0(-\infty, a); \quad 0'_a = 0(a, \infty) = 1(-\infty, a). \quad (4)$$

Введем необходимые определения. Пусть  $x(t)$  – любой переключательный процесс, отличный от тождественного нуля или единицы;  $a_x$  – момент первого изменения (начала) и  $b_x$  – момент последнего изменения (окончания)  $x(t)$ , причем оба момента конечны. Значение  $x_0$  процесса при  $t < a_x$  назовем его *начальным значением*. При этом будем говорить, что  $x(t)$  *начинается* импульсом (паузой), если  $x_0 = 0$  ( $x_0 = 1$ ). Аналогично значение  $x_\infty$  процесса при  $t > b_x$  назовем его *конечным значением*, говоря, что процесс  $x(t)$  *оканчивается* импульсом (паузой), если  $x_\infty = 0$  ( $x_\infty = 1$ ). Процессы  $x(t), y(t)$  назовем *непересекающимися во времени*, если  $b_x \leq a_y$ .

Общее число изменений значения переключательного процесса называется *длиной  $L$  процесса*. При  $L \leq 1$  процесс считается *простым*, при  $L \geq 2$  процесс считается *сложным*. Два переключательных процесса *равны*, если у них одинаковое число соответственно однотипных изменений, моменты которых совпадают. Два переключательных процесса с буквен-

ными моментами изменений считаем *эквивалентными*, если при любой численной конкретизации указанных моментов оба процесса становятся равными.

Будем записывать переключательные процессы в виде последовательности изменений с указанием момента изменения или в виде последовательности импульсов и пауз. Во втором случае для простоты опускаем начальное и конечное постоянные значения, а моменты промежуточных изменений указываем один раз либо в импульсе, либо в соседней паузе. Например, один и тот же процесс можно записать либо так:  $x(t) = 1'_a 0'_b 1'_c 0'_d 1'_e$ , либо так:

$$x(t) = 1(a, b)0(-, c)1(-, d)0(-, e).$$

Этот процесс до момента  $a$  равен 0, в интервале  $a \leq t < b$  он равен 1, в интервале  $b \leq t < c$  равен 0, в интервале  $c \leq t < d$  – снова 1, в интервале  $d \leq t < e$  снова 0 и при  $t \geq e$  принимает постоянное значение 1.

## 2. Двоичные операторы технических систем

Пусть имеется множество переключательных процессов  $x_1(t), \dots, x_n(t)$ , закон  $G$ , по которому это множество преобразуется в переключательный процесс  $y(t)$ , называется *двоичным оператором*. Таким образом,

$$y(t) = G[x_1(t), \dots, x_n(t)]. \quad (5)$$

В технических системах  $x_1(t), \dots, x_n(t)$  – входные процессы,  $y(t)$  – выходной процесс, а  $G$  – оператор системы. Оператор, реализующий преобразование (5), называется *n-местным*, по числу преобразуемых процессов. На операторном языке преобразуемые процессы  $x_1(t), \dots, x_n(t)$  называются *воздействиями на оператор  $G$* , а результирующий процесс  $y(t)$  – *реакцией* оператора. Мы ограничимся рассмотрением операторов, удовлетворяющих следующему условию (*принцип физической осуществимости*): значение реакции  $y(t)$  в любой момент времени  $t$  зависит только от значений воздействий  $x_1(t_1), \dots, x_n(t_n)$  в предшествующие  $t_1, \dots, t_n$  или же текущий  $t$  моменты времени ( $t_1 < t, \dots, t_n < t$ ) и от значений самой реакции  $y(t_*)$  в предшествующие моменты  $t_*$  ( $t_* < t$ ). Если зависимость  $y(t)$  от  $y_*(t)$  существенна, оператор называется *оператором с памятью*, если несущественна – *оператором без памяти*. Число моментов  $t_{*1}, \dots, t_{*s}$  ( $t_{*i} < t$ ), таких, что значение  $y(t)$  существенно зависит от значений  $y(t_{*1}), \dots, y(t_{*s})$ , называется *глубиной памяти* оператора. Это число может быть как конечным, так и бесконечным. В первом случае имеем *оператор с конечной памятью*, во втором – с *бесконечной*. Оператор без памяти называется *временным*, если  $y(t)$  существенно зависит от значения воздействий  $x_i(t_i)$  в предшествующие моменты времени  $t_i$  ( $t_i < t$ ), и *логическим* – в противном случае, т. е. если  $y(t)$  зависит только от значений воздействий  $x_1(t), \dots, x_n(t)$  в тот же текущий момент  $t$ . Для логического оператора зависимость (5) реакции от воздействий конкретизируется:

$$y = f(x_1, \dots, x_n), \quad (6)$$

где  $f$  – некоторая булева функция;  $x_1, \dots, x_n, y$  – мгновенные значения воздействий и реакции в один и тот же произвольный момент времени  $t$ .

Двоичный оператор можно задать с помощью уравнения, связывающего значение  $y(t)$  со значениями  $x_1(t_1), \dots, x_n(t_n), y(t_*)$ , где  $t_i \leq t, t_* < t$ , посредством алгоритма, позволяющего вычислить значения  $y(t)$  для любого  $t$ , и т. д. Удобным способом задания произвольного оператора является его *структурное представление* в виде суперпозиции (схемы) из *элементарных операторов*. Элементарным считается оператор, который является простейшим и потому неделимым, т. е. не представим суперпозицией более простых операторов. Удобство такого представления в том, что изучение произвольного оператора сводится к изучению существенно более простых элементарных операторов, число которых конечно.

Задачи изучения операторов технических систем можно условно разделить на три типа. *Задача анализа оператора* заключается в отыскании реакций  $y(t)$  заданного оператора на заданные воздействия  $x_1(t), \dots, x_n(t)$ . *Задача синтеза оператора* состоит в построении оператора, преобразующего заданные воздействия  $x_1(t), \dots, x_n(t)$  в требуемую реакцию  $y(t)$ . Под построением оператора понимается какое-нибудь конструктивное его задание – абстрактное или структурное (*абстрактный или структурный синтез*). *Задача синтеза воздействий* заключается в отыскании воздействий на оператор  $x_1(t), \dots, x_n(t)$  по заданному оператору  $G$  и его реакции  $y(t)$ .

### 3. Элементарные операторы

Будем записывать любой переключательный процесс с неутонченным характером участков (импульсов и пауз) в виде

$$x(t) = u(a_1, a_2) \bar{u}(-, a_3) \dots u^{(-1)^m}(a_{m-1}, a_m), \quad u \in \{0, 1\}, \quad (7)$$

где  $\bar{u}$  – отрицание  $u$ , а

$$u^p = \begin{cases} u & \text{при } p = 1; \\ \bar{u} & \text{при } p = -1. \end{cases} \quad (8)$$

Рассмотрим несколько элементарных временных операторов.

1. *Оператор  $D_\tau$  задержки на  $\tau$*  – это одноместный оператор, преобразующий воздействие  $x(t)$  вида (7) в реакцию

$$y(t) = D_\tau[x(t)] = x(t - \tau) = u(a_1 + \tau, a_2 + \tau) \bar{u}(-, a_3 + \tau) \dots u^{(-1)^m}(a_{m-1} + \tau, a_m + \tau), \quad (9)$$

т. е. сдвигающий входной процесс  $x(t)$  на постоянное время задержки  $\tau$ .

2. *Оператор  $D_\tau^\Phi$  фильтрации на  $\tau$*  – одноместный оператор, преобразующий каждый импульс и паузу  $u(a_i, a_{i+1})$  воздействия (7) в реакцию

$$y(t) = D_\tau^\Phi[u(a_i, a_{i+1})] = \begin{cases} u(a_i + \tau, a_{i+1} + \tau), & a_{i+1} - a_i \geq \tau; \\ \bar{u}, & a_{i+1} - a_i < \tau, \end{cases} \quad (10)$$

иными словами, сдвигающий входной процесс  $x(t)$  на время  $\tau$  и, кроме того, не пропускающий (фильтрующий) изменения  $x(t)$ , отстоящие друг от друга ближе, чем на  $\tau$ .

3. *Оператор достройки паузой до  $c$*  – одноместный оператор, преобразующий воздействие  $x(t)$  вида (7) в реакцию (достройка справа,  $c > a_m$ )

$$y(t) \equiv x_c(t) = \begin{cases} x(t), & u^{(-1)^m} = 0; \\ x(t)0(a_m, c), & u^{(-1)^m} = 1, \end{cases} \quad (11)$$

или в реакцию (достройка слева,  $c < a_1$ )

$$y(t) \equiv {}_c x(t) = \begin{cases} x(t), & u = 0; \\ 0(c, a_1)x(t), & u = 1. \end{cases} \quad (12)$$

4. *Оператор достройки импульсом до  $c$*  – одноместный оператор, преобразующий воздействие  $x(t)$  вида (7) в реакцию (достройка справа,  $c > a_m$ )

$$y(t) \equiv x^c(t) = \begin{cases} x(t), & u^{(-1)^m} = 1; \\ x(t)1(a_m, c), & u^{(-1)^m} = 0, \end{cases} \quad (13)$$

или в реакцию (достройка слева,  $c < a_1$ )

$$y(t) \equiv {}^c x(t) = \begin{cases} x(t), & u = 1; \\ 1(c, a_1)x(t), & u = 0. \end{cases} \quad (14)$$

Операторы достройки выполняются раньше других элементарных операторов.

5. *Оператор усечения до  $b$*  – одноместный оператор, преобразующий воздействие  $x(t)$  (7) в реакцию

$$y(t) \equiv x(t \wedge b) = u(a_1 \wedge b, a_2 \wedge b) \bar{u}(-, a_3 \wedge b) \dots u^{(-1)^m} (a_{m-1} \wedge b, a_m \wedge b) \quad (15)$$

путем взятия конъюнкции НЛ моментов изменения  $x(t)$  с данным моментом  $b$  (усечение справа) или в реакцию

$$y(t) \equiv x(t \vee b) = u(a_1 \vee b, a_2 \vee b) \bar{u}(-, a_3 \vee b) \dots u^{(-1)^m} (a_{m-1} \vee b, a_m \vee b) \quad (16)$$

взятием дизъюнкции НЛ данных моментов (усечение слева). При этом процесс  $x(t \wedge b)$  отличается от процесса  $x(t)$  заменой на интервале  $b < t < \infty$  всех значений  $x(t)$  конечным значением. Процесс  $x(t \vee b)$  отличается от  $x(t)$  заменой при  $-\infty < t < b$  всех значений  $x(t)$  начальным значением.

6. *Оператор умножения* – двухместный оператор, преобразующий пару воздействий  $x_1(t), x_2(t)$ , не пересекающихся во времени ( $b_{x_1} \leq a_{x_2}$ ) и таких, что конечное значение первого процесса  $x_1(t)$  совпадает с начальным значением второго  $x_2(t)$ , в реакцию вида

$$y(t) = \begin{cases} x_1(t), & t < b_{x_1}; \\ x_2(t), & t \geq b_{x_1}. \end{cases} \quad (17)$$

Эта реакция называется *произведением процесса  $x_1(t)$  на  $x_2(t)$*  и обозначается таким образом

$$y(t) = x_1(t) \circ x_2(t). \quad (18)$$

Из (17) видно, что произведение процесса  $x_1(t)$  на  $x_2(t)$  до момента  $b_{x_1}$  окончания  $x_1(t)$  совпадает с  $x_1(t)$ , с момента  $a_{x_2}$  начала  $x_2(t)$  совпадает с  $x_2(t)$ , в интервале  $[b_{x_1}, a_{x_2}]$  равно конечному значению  $x_1(t)$  (начальному значению  $x_2(t)$ ). Оператор умножения подчиняется ассоциативному закону, т. е. при  $b_{x_1} \leq a_{x_2} \leq b_{x_3}$

$$[x_1(t) \circ x_2(t)] \circ x_3(t) = x_1(t) \circ [x_2(t) \circ x_3(t)] = x_1(t) \circ x_2(t) \circ x_3(t), \quad (19)$$

но не подчиняется коммутативному закону, т. е. в общем случае  $x_1(t) \circ x_2(t)$  не совпадает с  $x_2(t) \circ x_1(t)$ .

7. *Оператор разбиения* – одноместный оператор, который разбивает процесс  $x(t)$  вида (7) на два последовательных подпроцесса:

$$\left. \begin{aligned} x_1(t) &= u(a_1, a_2) \bar{u}(-, a_3) \dots \tilde{u}(a_{i-1}, a_i), \quad \text{где } \tilde{u} = u \text{ или } \bar{u} \\ x_2(t) &= \bar{\tilde{u}}(a_i, a_{i+1}) \tilde{u}(-, a_{i+2}) \dots u^{(-1)^m} (a_{m-1}, a_m) \end{aligned} \right\}, \quad (20)$$

так что

$$x(t) = \begin{cases} x_1(t), & t < a_i; \\ x_2(t), & t \geq a_i. \end{cases} \quad (21)$$

Сравнение (21) с (17) показывает, что

$$x(t) = x_1(t) \circ x_2(t), \quad (22)$$

т. е. перемножение подпроцессов  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$  снова дает исходный процесс  $x(t)$ . Потому операторы умножения и разбиения взаимно обратны. Заключительное изменение в первом подпроцессе  $x_1(t)$  разбиения (20) назовем точкой деления процесса  $x(t)$ . Точка деления имеет вид  $1'_{a_i}$  или  $0'_{a_i}$ .

Рассмотрим несколько элементарных логических операторов. Как сказано выше, согласно (6) такой оператор можно задать с помощью булевой функции, преобразующей мгновенное значение воздействий в любой момент  $t$  в мгновенное значение реакции, относящееся к тому же моменту.

1. Конъюнктор – это двухместный оператор, преобразующий воздействия  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$  в реакцию  $y(t)$  согласно конъюнкции в выражении (1) в первой части работы, опубликованной в статье [1]

$$y = x_1 \wedge x_2. \quad (23)$$

2. Дизъюнктор – также двухместный оператор, преобразующий воздействия  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$  в реакцию  $y(t)$  согласно дизъюнкции в выражении (2) в первой части работы, опубликованной в статье [1]

$$y = x_1 \vee x_2. \quad (24)$$

3. Инвертор – одноместный оператор, преобразующий воздействие  $x(t)$  в реакцию  $y(t)$  согласно булевой функции отрицания в выражении (3) в первой части работы, опубликованной в статье [1]

$$y = \bar{x}. \quad (25)$$

4. Дизъюнктивный инвертор (оператор Вебба) – двухместный оператор, преобразующий воздействия  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$  в реакцию  $y(t)$  согласно булевой функции «отрицание дизъюнкции»:

$$y = \overline{x_1 \vee x_2}. \quad (26)$$

5. Конъюнктивный инвертор (оператор Шеффера) – двухместный оператор, преобразующий воздействия  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$  в реакцию  $y(t)$  согласно булевой функции «отрицание конъюнкции»:

$$y = \overline{x_1 \wedge x_2}. \quad (27)$$

Дизъюнктивный и конъюнктивный инверторы, строго говоря, не могут считаться элементарными операторами, так как они являются суперпозицией операторов (23)–(25). Однако на практике оба используются часто как элементарные операторы.

#### 4. Структурное представление операторов без памяти

Удобство структурного представления операторов (см. п. 2) делает целесообразной разработку специальной методики перехода от произвольного содержательного описания оператора к его структурному представлению, т. е. к схеме, реализующей оператор в виде суперпозиции конечного числа элементарных операторов. Такой переход включает два этапа:

- 1) от содержательного описания оператора к его математическому описанию;
- 2) от математического описания оператора к реализующей его схеме.

Первый этап неалгоритмичен и выполняется неформально, мы рассмотрим второй этап.

Реакция  $y(t)$  оператора без памяти в любой момент  $t$  зависит от значений воздействий  $x_1(t), \dots, x_n(t)$  в тот же самый момент  $t$ , а также от их значений  $x_1(t_1), \dots, x_n(t_n)$  в некоторые предшествующие моменты  $t_1, \dots, t_n$  (п. 2). Будем считать, что число таких предшествующих моментов для каждого воздействия конечно. Тогда зависимость реакции оператора без памяти от этих воздействий принимает вид:

$$y(t) = f[x_1(t), x_1(t_{11}), \dots, x_1(t_{1m_1}); \dots; x_n(t), x_n(t_{n1}), \dots, x_n(t_{nm_n})], \quad (28)$$

где  $f$  – некоторая булева функция;  $t$  – текущий момент;  $t_{ij} (t_{ij} < t)$  – предшествующие  $t$  моменты, значения воздействий в которых влияют на значение реакции в текущий момент  $t$ .

В частном случае, когда значения воздействий в предшествующие моменты несущественны, т. е. когда оператор логический, зависимость реакции от воздействий приобретает известный вид (6):

$$y = f(x_1, \dots, x_n). \quad (29)$$

Здесь  $x_1, \dots, x_n, y$  – мгновенные значения воздействий и реакции, взятые в один и тот же произвольный момент времени. Формулы (28), (29) дают математическое описание двух типов оператора без памяти: временного и логического.

Начнем с задачи структурного представления логического оператора, т. е. построения схемы, реализующей булеву функцию  $f$  (29) в виде суперпозиции элементарных операторов  $f_i$ . При этом достаточно ограничиться только логическими операторами  $f_i$ . Набор  $f_i$ , позволяющий реализовать любую функцию  $f$ , называется *функционально полным* или *базисом*. Образуют базис, например, следующие наборы операторов:

- 1) конъюнктор и инвертор;
- 2) дизъюнктор и инвертор;
- 3) конъюнктор, дизъюнктор и инвертор;
- 4) оператор Вебба;
- 5) оператор Шеффера.

Будем реализовывать логический оператор в базисе 3. Для такой реализации нужно выполнить четыре этапа:

- 1) перейти от имеющегося представления оператора к соответствующей булевой функции  $f$ ;
- 2) привести полученную функцию  $f$  к эквивалентному выражению в ДНФ или КНФ [1];
- 3) полученное выражение разложить по элементарным операциям – двухместным конъюнкции и дизъюнкции, используя для этого сочетательный закон, в соответствии с выражением (10) первой части работы, опубликованной в статье [1];
- 4) сопоставить каждой из элементарных операций – конъюнкции, дизъюнкции и отрицанию – соответствующий элементарный логический оператор.

При необходимости между этапами 2 и 3 можно выполнить этап упрощения функции  $f$ . Для этого выражение  $f$  подвергается подходящим эквивалентным преобразованиям [1].

*Пример 1.* Реализуем логический оператор, для которого зависимость реакции  $y$  от воздействий  $x_1, x_2, x_3$  такова, что  $y = 1$  на следующих наборах воздействий: 000 и 111. Выполнение этапов расчета.

- 1) Функция  $y = f(x_1, x_2, x_3)$  задана перечислением единичных наборов.
- 2) Согласно процедуре [1] ДНФ функции такова:  $y = \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \vee x_1 x_2 x_3$ .
- 3) По сочетательному закону [1] получаем выражение  $y = (\bar{x}_1 \bar{x}_2) \bar{x}_3 \vee (x_1 x_2) x_3$ .
- 4) Сопоставляем отрицаниям инверторы, конъюнкциям – конъюнкторы, дизъюнкции – дизъюнктор.

В результате находим схему, реализующую оператор (рис. 1).

Итак, любой логический оператор можно представить структурно в виде логической схемы, построенной из элементарных логических операторов.

Перейдем к структурному представлению временного оператора, построив схему, реализующую зависимость (28). Введем замену:

$$\left. \begin{aligned} x_1(t_{11}) = x_{n+1}(t), \dots, x_1(t_{1m_1}) = x_{n+m_1}(t) \\ x_2(t_{21}) = x_{n+m_1+1}(t), \dots, x_2(t_{2m_2}) = x_{n+m_1+m_2}(t) \\ x_n(t_{n1}) = x_{n+\sum_{i=1}^{n-1} m_i+1}(t), \dots, x_n(t_{nm_n}) = x_{n+\sum_{i=1}^n m_i}(t) \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

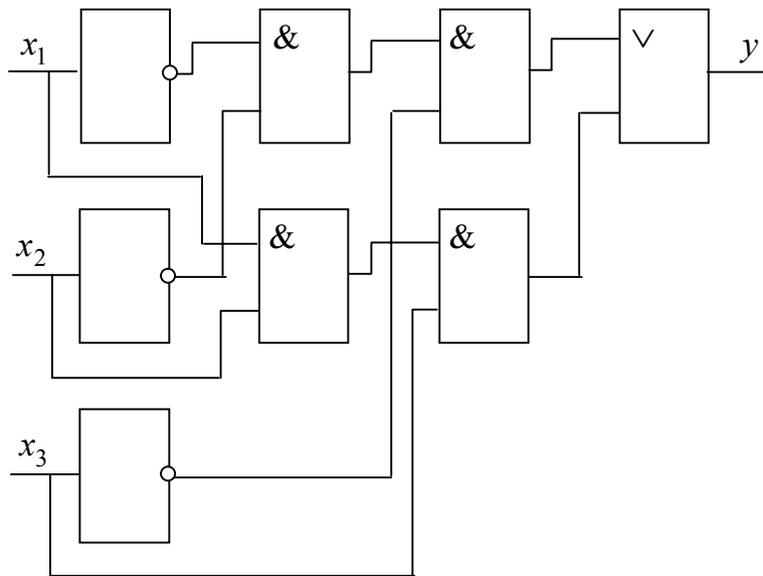


Рис. 1. Схема к примеру 1

Тогда зависимость (28) примет вид булевой функции

$$y = f \left( x_1, \dots, x_n, x_{n+1}, \dots, x_{n+\sum_{i=1}^n m_i} \right) \quad (31)$$

от расширенного множества аргументов  $x_1, \dots, x_{n+\sum_{i=1}^n m_i}$ , в которой  $x_i, y$  – мгновенные значения

воздействий и реакции, взятые в один и тот же, произвольный момент времени. Функция (31) имеет тип (29), т. е. задает некоторый логический оператор. Таким образом, структурное представление временного оператора распадается на задачу нахождения структурного представления логического оператора и задачу нахождения соотношений (30). Первая задача рассмотрена выше. Рассмотрим вторую задачу.

Обратимся, например, к первому соотношению из (30). Учитывая, что  $t_{11} < t$ , т. е.  $t_{11} = t - \tau_{11}$ , где  $\tau_{11} > 0$ , запишем его так:  $x_{n+1}(t) = x_1(t - \tau_{11})$  или, используя оператор задержки  $D_\tau$ ,

$$x_{n+1}(t) = D_{\tau_{11}} [x_1(t)]. \quad (32)$$

Видим, что любое соотношение (30) реализуется при помощи оператора задержки  $D_{\tau_{ij}}$  с нужным временем задержки  $\tau_{ij}$ . При этом для реализации всех соотношений (30) нет необходимости использовать соответствующее число операторов задержки. Действительно, соединяя последовательно несколько операторов задержки  $D_{\tau_1}, \dots, D_{\tau_p}$ , мы получаем новый

оператор  $D_\tau$  с суммарным временем задержки  $\tau = \sum_{i=1}^p \tau_i$ . Поэтому достаточно выбрать в качестве элементарного оператор  $D_\tau$  с временем задержки  $\tau$ , которое является общим делителем всех времен  $\tau_{ij} = t - t_{ij}$  в (30). Тогда реализация любого соотношения (30) сведется к последовательному соединению нужного числа элементарных операторов  $D_\tau$ .

Таким образом, любой временной оператор можно представить структурно в виде логической схемы, построенной из элементарных логических операторов и элементарного оператора задержки.

Таким образом, любой временной оператор можно представить структурно в виде логической схемы, построенной из элементарных логических операторов и элементарного оператора задержки.

### 5. Математическая модель надежности системы

Рассмотрим произвольную *систему* (техническую, экономическую, биологическую и т. д.), состоящую из  $N$  взаимодействующих подсистем, которые назовем *блоками*. В системе имеется  $n$  *входов* и  $r$  *выходов*. По входам система получает предусмотренные условиями ее работы полезные воздействия (физические входные сигналы, задачи, подлежащие решению, управляющие команды и т. д.) или вредные воздействия (помехи, вибрация, повышенная температура, влажность и т. д.), влияющие на ее надежность, причем каждый вход предназначен для воздействий одного типа.

С выходов системы снимаются различные результаты ее работы (обработанные сигналы, решенные задачи, выполненные команды и т. д.), причем каждый выход характеризует какую-то одну функцию (один результат работы) системы.

Зададим *надежностное состояние* (НС) системы двоичным вектором

$$\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_r), \quad y_i \in \{0, 1\}, \quad (33)$$

где  $i$ -я компонента  $y_i$  характеризует НС  $i$ -го выхода системы

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{если система работоспособна по } i\text{-й функции;} \\ 0, & \text{если система неработоспособна по } i\text{-й функции} \\ & (\text{частичный отказ } i\text{-го типа}). \end{cases} \quad (34)$$

Аналогично зададим НС совокупности блоков двоичным вектором

$$\mathbf{a} = (a_1, \dots, a_N), \quad a_i \in \{0, 1\}, \quad (35)$$

причем  $i$ -я компонента  $a_i$  характеризует НС  $i$ -го блока:

$$a_i = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-й блок работоспособен;} \\ 0, & \text{если } i\text{-й блок отказал.} \end{cases} \quad (36)$$

Опишем НС совокупности входов системы вектором

$$\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n), \quad x_i \in \{0, 1\}, \quad (37)$$

у которого  $i$ -я компонента  $x_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) характеризует НС  $i$ -го входа:

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{если система воспринимает воздействие } i\text{-го типа;} \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (38)$$

Описание входов системы при помощи двоичного вектора (37) пригодно и в более общем случае, когда существен не только факт наличия (отсутствия) воздействия каждого типа, но и значения воздействия. При этом множество возможных значений воздействия каждого типа  $i$  дискретизуется (если воздействия непрерывны) и кодируется двоичным кодом  $x_{i_1}, \dots, x_{i_{m_i}}$ ; последний заменяет  $x_i$  в основном коде (37).

Итак, надежностную ситуацию в системе в произвольный момент времени  $t$  можно полностью описать тройкой векторов

$$\mathbf{z} = (\mathbf{x}, \mathbf{a}, \mathbf{y}), \quad (39)$$

где  $\mathbf{x}$  – НС входов;  $\mathbf{a}$  – НС блоков;  $\mathbf{y}$  – НС выходов системы в момент  $t$ . Это описание – статическое, относящееся к выбранному моменту времени. Реально все три вектора зависят от времени и надежностную эволюцию системы можно описать вектор-функцией

$$\mathbf{z}(t) = [\mathbf{x}(t), \mathbf{a}(t), \mathbf{y}(t)]. \quad (40)$$

Это описание динамическое, оно охватывает необходимый интервал времени функционирования системы.

Первая компонента (40) – вектор-функция  $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), \dots, x_n(t)]$  – задает эволюцию НС входов системы, т. е. воздействия на входах рассматриваемой системы. Здесь  $x_i(t)$  – двоичная функция непрерывного времени  $t$ , описывающая эволюцию НС  $i$ -го входа, т. е. воздействие на  $i$ -м входе системы,  $x_i(t)$  имеет вид последовательности интервалов наличия и отсутствия  $i$ -го внешнего фактора, влияющего на надежность системы. Из физического

смысла функции  $x_i(t)$  следует, что она определена в любой момент бесконечного временного интервала  $t$  ( $-\infty < t < \infty$ ), причем на любом конечном подынтервале этого интервала  $x_i(t)$  меняется конечное число раз. Условимся, что значение функции  $x_i(t)$  в момент ее изменения  $t = a$  совпадает с ее значением при  $t > a$ . Так, воздействия на входы системы  $x_1(t), \dots, x_n(t)$  – некоторые переключаемые процессы.

Вторая компонента в (40) – вектор-функция  $\mathbf{a}(t) = [a_1(t), \dots, a_N(t)]$  – задает эволюцию НС блоков системы, причем  $a_i(t)$  – двоичная функция времени, задающая эволюцию НС  $i$ -го блока в виде последовательности интервалов наличия и отсутствия работоспособности блока. Аналогично убеждаемся, что процессы надежностной эволюции блоков  $a_1(t), \dots, a_N(t)$  – переключаемые процессы. Назовем их *надежностными процессами в блоках*.

Третья компонента в (40) – вектор-функция  $\mathbf{y}(t) = [y_1(t), \dots, y_r(t)]$  – описывает эволюцию НС выходов системы, т. е. эволюцию работоспособности в отношении функций системы. Здесь  $y_i(t)$  – двоичный процесс, задающий эволюцию НС  $i$ -го выхода, т. е. эволюцию работоспособности системы в отношении ее  $i$ -й функции;  $y_i(t)$  имеет вид последовательности интервалов выполнения и невыполнения функции. Как и выше, устанавливаем, что процессы надежностной эволюции выходов системы  $y_1(t), \dots, y_r(t)$  – переключаемые процессы. Назовем их *надежностными процессами (НП) на выходах системы*.

Итак, надежностную эволюцию в некоторой системе можно полностью описать тремя группами процессов:

- 1) воздействия  $x_1(t), \dots, x_n(t)$  на  $n$  входов системы, влияющие на ее надежность;
- 2) НП  $a_1(t), \dots, a_N(t)$  в  $N$  блоках системы;
- 3) НП  $y_1(t), \dots, y_r(t)$  на  $r$  выходах системы, характеризующие эволюцию работоспособности в отношении  $r$  разных функций системы.

Эти группы процессов зависимы. Действительно, выполнение системой возложенных на нее функций определяется НП в блоках системы и входными воздействиями на систему. Из физических соображений следует, что выполнение системой любой  $i$ -й функции в любой момент времени  $t$  зависит только от значений НП в блоках и значений входных воздействий в тот же момент  $t$  и предшествующие моменты (и, возможно, от выполнения системой ее функций в предшествующие моменты времени). Таким образом,

$$\left. \begin{aligned} y_1(t) &= G_1[x_1(t), \dots, x_n(t); a_1(t), \dots, a_N(t)] \\ y_r(t) &= G_r[x_1(t), \dots, x_n(t); a_1(t), \dots, a_N(t)] \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

где  $G_i$  ( $i = 1, \dots, r$ ) – это некоторые двоичные операторы, удовлетворяющие принципу физической осуществимости. Эти операторы назовем собственными *надежностными операторами (НО)* системы. Совокупность собственных НО системы

$$\mathbf{G} = (G_1, \dots, G_r) \quad (42)$$

является наиболее полной *надежностной* характеристикой нашей системы. Зная эту характеристику, можно из (41) вычислить НП  $y_1(t), \dots, y_r(t)$  на выходах системы при любых заданных входных воздействиях  $x_1(t), \dots, x_n(t)$  и НП  $a_1(t), \dots, a_N(t)$  в блоках системы. Получаемые НП  $y_1(t), \dots, y_r(t)$  полностью характеризуют надежность результатов работы системы. В частности, по ним можно вычислить любой *показатель надежности* (ПН) системы. Действительно, это связано с тем, что каждый ПН  $R$  представляет собой некоторый функционал  $F$  от  $y_1(t), \dots, y_r(t)$ :

$$R = F[y_1(t), \dots, y_r(t)]. \quad (43)$$

Рассмотрим этот вопрос подробнее. Выбор того или иного ПН системы зависит от назначения системы и *надежностного режима* ее работы – без восстановления или с восста-

новлением отказавших блоков. Для системы без восстановления основным ПН является *наработка  $T$  до отказа*, определяемая как интервал времени от момента  $t_0$  начала эксплуатации системы до ее первого отказа. Другим ПН этих систем может служить *функция готовности  $K_r(t)$* , определяемая как

$$K_r(t) = \begin{cases} 1, & \text{если система в момент } t \text{ работоспособна;} \\ 0, & \text{если система в момент } t \text{ неработоспособна,} \end{cases} \quad (44)$$

и функция надежности  $P(t)$ :

$$P(t) = \begin{cases} 1 & \text{при отсутствии отказов на интервале } [t_0, t); \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (45)$$

Функции  $P(t)$ ,  $K_r(t)$  невозстанавливаемой системы являются переключательными процессами одинакового вида

$$K_r(t) = P(t) = 0'_T, \quad (46)$$

так что ПН  $K_r(t)$ ,  $P(t)$ ,  $T$  оказываются зависимыми. Для систем с восстановлением основными ПН служат функция готовности  $K_r(t)$  (имеющая в отличие от (46) вид переключательного процесса с несколькими изменениями) и ресурс  $V$ , определяемый как интервал времени от момента  $t_0$  начала эксплуатации системы до момента ее окончательного (невозстанавливаемого) отказа. Используется и функция надежности  $P(t)$ , в виде (46), а также *коэффициент готовности  $K_r$*  – доля времени, в течение которого система работоспособна. Он равен

$$K_r = \frac{1}{V} \int_{t_0}^{t_0+V} K_r(t) dt, \quad (47)$$

т. е. является средним значением функции готовности  $K_r(t)$  на некотором интервале  $(t_0, t_0 + V)$ . Часто надежность восстанавливаемой системы характеризуют *наработкой  $T_i$  между отказами*, определяемой как интервал времени от момента очередного  $i$ -го восстановления системы до момента следующего после него отказа, и временем  $i$ -го восстановления  $T_{vi}$ . Как видно из (45), (47), готовность  $K_r(t)$  является первичным ПН системы, через который выражаются другие ее ПН. Отметим, что при  $T_i = T$ ,  $T_{vi} = T_v$

$$K_r = T / (T + T_v). \quad (48)$$

Вычисление ПН по соотношению (43) требует знания *критерия отказа* системы. Этот критерий зависит от назначения системы, режима эксплуатации и т. д. Если по условиям работы система должна выполнять одновременно все  $r$  своих функций, то критерием отказа системы является невыполнение хотя бы одной из этих функций (случай 1). Если система должна выполнять, по крайней мере, одну из возможных функций, то критерий отказа – невыполнение всех  $r$  функций, (случай 2). Если система должна выполнять не менее  $p$  ( $1 < p < r$ ) функций, безразлично каких, то критерий отказа системы – невыполнение не менее  $r - p$  каких-либо функций (случай 3). Возможны и более сложные критерии отказа системы, например, учитывающие еще неравноценность различных функций системы. Знание критерия отказа системы позволяет выразить ее ПН  $K_r(t)$  и  $P(t)$  через НП на выходах системы  $y_1(t), \dots, y_r(t)$ .

$$K_r(t) = y_{\text{экв}}(t) = \left. \begin{array}{l} y(t) \\ \bigwedge_{i=1}^r y_i(t) \quad \text{в случае 1,} \\ \bigvee_{i=1}^r y_i(t) \quad \text{в случае 2,} \\ \bigvee_{s=p}^r \bigvee_{i_1 \neq \dots \neq i_s} [y_{i_1}(t) \dots y_{i_s}(t)] \quad \text{в случае 3.} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{(однофункциональная система)} \\ \text{(многофункциональная система)} \end{array} \quad (49)$$

Здесь  $\wedge$ ,  $\vee$  – конъюнкция и дизъюнкция двузначной логики,  $y_{\text{экв}}(t)$  – эквивалентный НП в системе, полученный объединением всех НП на выходах;

$$P(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } y_{\text{экв}}(\tau) = 1 \text{ при } 0 \leq \tau \leq t, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (50)$$

Таким образом вычисление различных ПН системы сводится к одной более общей задаче – определению НП на выходах системы.

Введенные выше операторные зависимости (41) НП на выходах произвольной системы от НП на ее входах и в блоках задают *надежностную модель системы*. Эта модель имеет две важные особенности:

- 1) работоспособность системы определяется не только работоспособностью ее блоков, но и воздействиями на ее входах;
- 2) работоспособность системы в любой текущий момент может зависеть от работоспособности блоков и входных воздействий не только в этот, но и в предшествующие моменты (и, возможно, от предшествующих значений работоспособности системы).

### Заключение

Работа публикуется в двух частях. В первой части работы [1] был описан математический аппарат создаваемой логической теории надежности. Также были изложены дискретная и непрерывная логики и описаны вероятностные расчеты с логическими функциями от случайных аргументов.

В настоящей статье – второй части работы, на основе разработанного в [1] математического аппарата логической теории надежности решена задача создания автоматной модели надежности систем, которая дает возможность выполнять практические расчеты надежности реальных систем.

С математической точки зрения введенная надежностная модель системы в виде операторной зависимости (41) замечательна тем, что ее структурным воплощением является некоторый динамический автомат (рис. 1), входные процессы которого связаны с его выходными процессами указанной зависимостью. Таким образом, вычисление НП на выходах системы по известным НП в ее блоках и на входах сводится к хорошо известным и детально разработанным в теории динамических автоматов методам вычисления выходных процессов динамических автоматов по их входным процессам [8, 9]. Поскольку в статике в любой фиксированный момент времени выходные значения автомата связаны с его входными значениями суперпозицией операций двузначной логики, а в динамике выходные процессы автомата связаны с его входными процессами суперпозицией операций НЛ, то можно говорить, что предложенная модель и вытекающие из нее теория и методы расчета надежности систем являются логическими.

Настоящая работа продолжает цикл исследований автора по разработке математического аппарата и математических моделей логической теории надежности. От опубликованных ранее работ автора [10, 11] она отличается усовершенствованием математической модели и расчетных формул, что облегчит практическое приложение разработанных ранее методов и уменьшит вычислительную сложность расчета надежности технических систем.

### Литература

1. Левин В. И. Логические методы расчета надежности систем. Часть I. Математический аппарат // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 2. С. 182-195.
2. Ллойд Д. К., Липов М. Надежность: организация, исследования, методы, математический аппарат. – М.: Советское радио, 1964. – 350 с.
3. Барлоу Р., Прошан Ф. Математическая теория надежности. – М.: Советское радио, 1969. – 410 с.
4. Райншке К. Модели надежности и чувствительности систем. – М.: Мир, 1979. – 454 с.
5. Левин В. И. Теория надежности радиотехнических систем. – М.: Советское радио, 1978 – 264 с.
6. Поспелов Д. А. Логические методы анализа и синтеза схем. – М.: Энергия, 1974. – 350 с.
7. Левин В. И. Бесконечнозначная логика в задачах кибернетики. – М.: Советское радио, 1982. – 176 с.
8. Левин В. И. Введение в динамическую теорию конечных автоматов. – Рига: Зинатне, 1975. – 376 с.
9. Левин В. И. Теория динамических автоматов. – Пенза: Изд-во Пензенского государственного технического университета, 1995. – 407 с.
10. Левин В. И. Логические методы в теории надежности. II. Математическая модель надежности // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2010. Т. 16. № 1. С. 119-132.
11. Левин В. И. Логическое моделирование надежности систем управления II // Известия Пензенского государственного педагогического университета имени В.Г. Белинского. 2011. № 26. С. 578-588.

### References

1. Levin V. I. Evaluation of Reliability of Systems by Logical Methods. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 2, pp. 182-195 (in Russian).
2. Lloyd D. K., Lipov M. *Nadezhnost: organizaciya, issledovaniya, metody, matematicheskiy apparat*. [Reliability: Organization, Research, Methods, Mathematical Means]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1964. 350 p. (in Russian).
3. Barlow R. E., Proshan F. *Mathematical Theory of Reliability*. N.-Y., John Wiley and Sons, 1965.
4. Rainshke K. *Modeli nadezhnosti i chuvstvitelnosti system* [Models of Reliability and Sensitivity of Systems]. Moscow, Mir Publ., 1979. 454 p. (in Russian).
5. Levin V. I. *Teoriya nadezhnosti radiotekhnicheskikh sistem* [Theory of Reliability of Radiotechnical Systems]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1978. 264 p. (in Russian).
6. Pospelov D. A. *Logicheskie metody analiza i sinteza skhem* [Logical Methods of Analysis and synthesis of Schemes]. Moscow, Energiya Publ., 1974. 350 p. (in Russian).
7. Levin V. I. *Beskonechnoznachnaya logika v zadachah kibernetiki* [Continuous Logic in Problems of Cybernetics]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1982. 176 p. (in Russian).
8. Levin V. I. *Vvedenie v dinamicheskuyu teoriyu kohechnykh avtomatov* [Introduction in Dynamical Theory of Finite Automata]. Riga, Zinatne Publ., 1975. 376 p. (in Russian).
9. Levin V. I. *Teoriya dinamicheskikh avtomatov* [Theory of Dynamical Automata]. Penza, Penza State Technical Univ. Publ., 1995. 407 p. (in Russian).
10. Levin V. I. Logicheskie metody v teorii nadezhnosti. II. Matematicheskaya model nadezhnosti [Logical Methods in Theory of Reliability. II. Mathematical model of Reliability]. *Transaction of the TSTU*, 2010, vol. 16, no. 1, pp. 119-132 (in Russian).
11. Levin V. I. Logicheskoe modelirovanie nadezhnosti system upravleniya [Logical Modeling of Reliability of Control Systems]. *Izvestiya Penzenskogo gos. ped. un-ta im. V.G. Belinskogo*, 2011, no. 26, pp. 578-588. (in Russian).

Статья поступила 21 декабря 2017 г.

### Информация об авторе

Левин Виталий Ильич – доктор технических наук, профессор, PhD, Full Professor. Заслуженный деятель науки РФ. Пензенский государственный технологический университет. Область научных интересов: логика; математическое моделирование в технике, экономике, социологии, истории; принятие решений; оптимизация; теория автоматов; теория надежности; распознавание; история науки; проблемы образования. E-mail: vilevin@mail.ru  
Адрес: 440039, Россия, г. Пенза, пр. Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11.

---

## Logical Methods of Computing of Systems Reliability. Part II. Mathematical Model of Reliability

V. I. Levin

**Relevance.** In recent years, the increasing attention of scientists and designers of communication systems has been acquiring the issues of improving methods for assessing the reliability and safety of technical systems, in connection with the tasks put forward to increase the values of these characteristics. **Purpose** of the article. is to develop an automata-logical model of the reliability of technical systems and the corresponding logical methods for assessing the reliability of such systems, using not traditional probabilistic but deterministic logical reliability indicators. **Method.** To achieve this goal, it was suggested to use as the initial data the observed moments of sequential failures and recoveries of the elements of the technical system, and as the reliability characteristics of the system itself, the moments of sequential failures and recoveries of the system. In this case, the problem of estimating the reliability of a system is reduced to constructing its mathematical model in the form of automata-logical functions expressing the moments of its sequential failures and restores through analogous moments of all its elements. In this part of article the automata-logical model is developed in detail, useful for calculate the logical function of the reliability of technical systems. **Novelty** of the work is the construction of an adequate logical model of the system's reliability, which makes it possible to reduce the reliability estimate of a technical system to the calculation of its logical reliability functions. **Result.** In this part of article the logical model of reliability and methods of its investigation are developed in detail, allowing to introduce new indicators of reliability of technical systems that do not require for their evaluation the use of probability methods and initial statistical data on element failures. In the article, based on the developed logical reliability model and methods of its investigation, the problem of constructing an automaton model of system reliability that will allow practical calculations of the reliability of real systems by methods of the theory of dynamic automata is solved.

**Keywords:** switching process, reliability process, dynamical automata, binary operator, structure of operator, logical theory of reliability.

### Information about Author

Vitaly Ilich Levin – Doctor of Technical Sciences, Full Professor. Honoured Scientist of Russia. Penza State Technological University. Field of Research: logic; mathematical modeling in technics, economics, sociology, history; decision making, optimization, recognition, automata theory, reliability theory, history of science, problems of education. E-mail: vilevin@mail.ru  
Address: Russia, 440039, Penza, pr. Baydukova / Gagarin st., 1a/11.

УДК 623.618

## Анализ подходов к формализации показателя информационного превосходства на основе теории оценки и управления рисками

Михайлов Р. Л.

**Актуальность.** В настоящее время в вооруженных силах развитых стран существует устойчивая тенденция к внедрению концепции управления боевыми действиями по сетцентрическому принципу. Неотъемлемым атрибутом данной концепции является информационное противоборство, то есть двусторонний конфликт в информационной сфере, ведение которого на тактическом и оперативном уровнях управления возлагаются на подсистемы радиомониторинга и радиоэлектронной борьбы. В то же время, в известных автору работах отсутствует формализованное описание показателя информационного превосходства – ключевого показателя эффективности ведения информационного противоборства, который бы связывал показатели эффективности каждой из указанных подсистем. **Целью работы** является анализ математических моделей теории оценки и управления рисками на предмет их использования в новой предметной области – в сфере информационного противоборства. **Используемые методы.** Решение задачи основано на использовании методов системного анализа, а также методов индукции и дедукции теории логики. **Результат.** На основе анализа более 50 источников выявлены особенности математической оценки и управления рисками в экономической сфере и в сфере безопасности информационных систем. Проанализированы математические модели, которые могут лечь в основу формализации показателя информационного превосходства, показаны пути их совершенствования в интересах адекватного отображения процесса информационного противоборства. **Новизна.** Элементом новизны работы является определение необходимости учета целенаправленных действий противостоящей стороны в ходе информационного противоборства на основе математического аппарата в области обеспечения безопасности информационных систем, а также учета игрового, по сути, характера его ведения и, соответственно, моделей оценки и управления рисками в экономических системах, которые позволяют оценить как возможный вследствие принятия управленческих решений доход, так и убыток в активах. **Практическая значимость.** Представленный анализ может быть использован специалистами для обоснования новых технологических решений в области информационного противоборства, а также военными специалистами – для обоснования новых форм и способов организации взаимодействия разнородных сил и средств при ведении вооруженной борьбы. Кроме того, данный анализ будет полезен научным работникам и соискателям, ведущим научные исследования в области координации в сложных многоуровневых системах управления.

**Ключевые слова:** оценка рисков, управление рисками, информационное противоборство, информационное превосходство, сетцентрический принцип управления.

### Актуальность

В настоящее время ключевая парадигма ведения вооруженного противоборства, действующая в вооруженных силах США и стран НАТО, а также внедряемая в РФ, базируется на концепции управления боевыми действиями по

---

#### Библиографическая ссылка на статью:

Михайлов Р. Л. Анализ подходов к формализации показателя информационного превосходства на основе теории оценки и управления рисками // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 3. С. 98-118. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-03/05-Mikhailov.pdf>

#### Reference for citation:

Mikhailov R. L. Analysis of Approaches to the Formalization of the Indicator of Information Superiority Based on the Theory of Assessment and Risk Management. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 3, pp. 98-118. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-03/05-Mikhailov.pdf> (in Russian).

сетевому принципу. О сущности и содержании данной концепции написано достаточно подробно и много, из последних публикаций по этой тематике следует отметить работы [1-6]. Ключевыми и неразрывно связанными ее компонентами стали такие понятия, как «информационное противоборство», «информационное превосходство», «информационные операции», «действия в кибернетическом пространстве». Не пытаясь «привести к общему знаменателю» взгляды различных авторов, следует отметить, что все они сходятся в определении основной целью информационного противоборства достижение информационного превосходства над противостоящей стороной. Это связано с тем, что именно завоевание и удержание информационного превосходства в настоящее время становится обязательным этапом и необходимым условием начала и ведения современных военных действий. При этом под информационным превосходством понимается *возможность и способность осуществлять непрерывный сбор сведений, их обработку, распределение потока достоверной информации, а также способность не допустить выполнения аналогичных действий противником*. Проявляться информационное превосходство может в различных формах – от возможности и способности более качественно и быстро оценивать обстановку, принимать и доводить до подчиненных адекватные решения, до исключения (существенного затруднения) информационного обеспечения противника за счет проведения наступательных информационных операций [7].

В работе [8] указывается на два направления, в рамках которых может быть развернуто информационное противоборство: информационно-техническое и информационно-психологическое. Последнее из направлений применимо, в основном, на стратегическом уровне управления, в то время как на тактическом и оперативном уровнях под информационным противоборством в настоящее время понимаются отдельные вопросы организации радиомониторинга (РМ) и радиоэлектронной борьбы (РЭБ) [8], которые решают соответствующие подсистемы (РМ и РЭБ), представляющие собой совокупность средств РМ и РЭБ, размещенных на театре военных действий, и являющиеся обеспечивающими составными частями системы управления войсками и оружием (СУВО). При этом имеет место необходимость координации данных подсистем применительно к решению задачи распределения объектов информационного пространства противостоящей стороны между средствами подсистемы РМ и средствами радиоэлектронного подавления (РЭП), входящими в состав подсистемы РЭБ, в интересах как обеспечения достижения данными подсистемами своих целей функционирования, так и цели СУВО (обеспечения информационного превосходства над противостоящей стороной) в целом.

Целью подсистемы РМ, в самом общем описании, является перехват сообщений, циркулирующих по каналам связи, в целях обеспечения военного руководства информацией о противостоящей стороне, в то время как подсистема РЭБ функционирует в целях срыва процесса управления противостоящей стороны путем подавления каналов связи ее СУВО. В интересах достижения своих целей каждая из этих подсистем заинтересована в воздействии на как можно большее количество объектов информационного пространства противостоящей

стороны, однако вследствие естественных причин один и тот же объект не может быть распределен одновременно средству РМ и средству РЭП. Вместе с тем, в известных автору работах отсутствует описание показателя информационного превосходства, учитывающего как эффективность координации данных подсистем при распределении объектов информационного пространства противостоящей стороны, так эффективности аналогичных процессов противостоящей стороны [9].

Сам процесс принятия решений в сложных организационно-технических системах представляет собой трудоемкую задачу, которую осложняют неполнота исходной информации, наличие множества показателей качества (критериев) оценки исходов альтернативных решений задачи, сокращение времени принятия решений и повышение требований к опыту и квалификации лиц, принимающих решения. Неполнота исходной информации связана с неопределенностью прогнозируемой ситуации, в рамках которой решение должно функционировать. В работе [10] И.Г. Черноруцкий выделяет два различных характера неопределенности:

- «природная» неопределенность, связанная с неопределенностью состояния внешней среды;
- неопределенность типа «активный партнер», отражающая поведение других субъектов по выбору решения.

«Природная» неопределенность, то есть отсутствие *целенаправленного* негативного внешнего воздействия на процесс функционирования системы исследуется при оценке и управления рисками в экономической деятельности организации. Особое место в подобных исследованиях занимают вопросы функционирования страховых организаций, в связи с чем существует отдельное направление математической теории – актуарная математика.

Учет неопределенность типа «активный партнер» приводит к постановке задачи принятия решений в условиях конфликта, и при анализе методов решения подобных задач активно используются элементы теории игр [11]. Наличие конфликта с другой системой в условиях неопределенности стратегии ее *целенаправленных* деструктивных воздействий является неотъемлемой чертой процесса оценки и управления рисками информационной безопасности организационно-технических систем (ОТС). Вместе с тем, стоит отметить тот факт, что в принципе невозможно «победить» нарушителя, и, соответственно, задачей управления рисками является снижение ущерба от него.

Кроме того, авторы работы [12] связывают факт риска с возможностью возникновения некоторых событий, которые нарушают текущее состояние системы или естественное (прогнозируемое) течение процесса ее функционирования. В связи с этим, проблема управления риском рассматривается в двух вариантах: при «естественном» ходе процессов и при их непрогнозируемом нарушении.

Таким образом, актуальность настоящей работы основывается, с одной стороны, на отсутствии в настоящее время формализованного описания показателя информационного противоборства, и, с другой стороны, на отсутствии в известных автору работах анализа возможности использования математическо-

го аппарата теории рисков для описания такого показателя. Искомые математические модели оценки показателя информационного противоборства должны включать элементы оценки риска в условиях наличия целенаправленного противодействия рассматриваемой системе и, кроме того, должны позволять оценивать как потенциальный ущерб от этого противодействия, так и возможное приращение целевого показателя информационного противоборства. В связи с этим необходимо провести анализ научно-методического аппарата оценки и управления рисками как в экономических системах, так и в системах информационной безопасности.

### **Анализ подходов к оценке и управлению рисками в экономических системах**

Исследования по проблемам оценки и управления рисками экономической деятельности организации посвящены работы таких отечественные и зарубежные ученые как В.И. Авдийский, А.П. Альгин, Т. Бартон, В.И. Бархатов, Т. Бачкай, В.Е. Беннинг, А.Н. Буренин, К. Гилкрест, М.В. Грачева, Грюнинг Х. Ван, В.П. Буянов, А.В. Воронцовский, В.Н. Вяткин, В.А. Гамза, П.А. Герасимов, П.Г. Грабовый, В.А. Горелик, В.М. Гранатуров, Ю.Ю. Екатинославский, Б. Зимолон, В.В. Ильин, Р.М. Качалов, К.А. Кирсанов, Г.Б. Клейнер, В.Ю. Королев, А.А. Кудрявцев, М.Г. Лапуста, И.А. Лебедев, М.В. Лисанов, А.А. Лобанов, Маккарти Мэри Пэт, А. Маршалл, Б.А. Матвеев, Е.И. Мельникова, Д. Месена, Д. Мико, Дж. Милль, Л.А. Михайлов, Д.А. Никульшин, В. Окулов, С.Н. Петрова, А. Пигу, Б.Н. Порфирьев, Б.А. Райзберг, М.А. Рогов, В.И. Рябикин, В.Т. Севрук, Н.А. Сердюкова, Н.У. Сениор, В.С. Ступаков, Г.С. Токаренко, Р. Тримпоп, П. Уокер, Ф. Фабоцци, О.В. Хмыз, Н.В. Хохлов, С. Хьюс, К. Хэдхэд, Дж.Дж. Хэмптон, Г.В. Чернова, А.В. Чугунов, А.С. Шапкин, У. Шарп, Л.Г. Шаршукова, У. Шенкир, С.Я. Шоргин, Н.В. Шумихина и др. [13, 14].

Исторически первой была сформирована концепция минимизации риска, основанная на постулатах классической теории риска, родоначальниками которой являются Дж. Милль [15] и Н.У. Сениор, где категория «риск» интерпретируется исключительно с точки зрения возможности возникновения ущерба, потери или убытка. Развитие данной теории, сторонниками которой являются такие известные деятели экономической науки как Б.А. Райзберг [16], Н.В. Хохлов [17], М.В. Грачева [18], Г.В. Чернова, А.А. Кудрявцев [19] и многие другие, учитывающие сугубо негативные последствия проявления риска, сводит управление риском преимущественно к применению способов и методов, направленных на нейтрализацию потенциального ущерба или сведение уровня риска к минимально возможному значению. Иными словами, основное содержание концепции минимизации риска сконцентрировано на разработке и реализации методов управления, ориентированных на уменьшение риска до максимально возможного уровня, а в идеале – его полного или частичного избегания.

Вместе с тем, такие экономисты как А.П. Альгин [20], А.С. Шапкин [21], А.А. Воронцовский [22] и другие, являющиеся приверженцами неоклассиче-

ской теории риска, к основоположникам которой относят А. Маршалла и А. Пигу [23], считают категорию «риск» более сложным и емким понятием, подразумевающим не только потери, но и положительные последствия наступления непредвиденных событий. Впоследствии математический аппарат классического риск-менеджмента пополнился методами, основанными на сопоставимости оценки предельной полезности от управленческого решения в условиях риска и, собственно, меры риска за счет оценки и представления обоих этих показателей в общих единицах измерения [23].

В работе Б.Н. Порфирьева [24] впервые указано на невозможность достижения нулевого уровня риска, то есть полного его отсутствия, при этом выделено свойство приемлемости, что явилось основой образования концепции приемлемого риска. Данная концепция, получившая широкое распространение в зарубежной и отечественной практической деятельности, в настоящее время лежит в основе практически всех программ управления экономическими рисками. В.С. Ступаков и Г.С. Токаренко в своих работах отмечают, что ее целью является определение оптимального компромисса между такими противоречивыми точками зрения на риск, как «риск – благородное дело» и в тоже время «риск нужно сводить к минимуму» [25]. Основная идея данной концепции состоит в восприятии риска как управляемого процесса, в признании невозможности полностью избавиться от риска экономических потерь и в возможности его снижения до определенного, допустимого, приемлемого уровня, когда риск перестает быть угрожающим. Под приемлемым риском следует понимать такой уровень риска, который в данной ситуации с учетом факторов внешней и внутренней среды является допустимым, целесообразным и обоснованным исходя из социально-экономических соображений [14].

В словаре Уэбстера [26] риск определяется как «опасность, возможность убытка или ущерба». Следовательно, применительно к анализу конечного экономического результата риск отождествляется с возможностью поступления какого-либо неблагоприятного события, влияющего на такой результат: например, потери некоторой части или всего дохода, появление дополнительных расходов и т. п. Другими словами, под риском понимается возможная опасность потерь, вытекающая из специфики тех или иных явлений природы и человеческой деятельности.

В общем случае риск следует рассматривать с различных позиций. Соответственно, риск может «выступать» в качестве различных категорий: это и историческая, и социально-психологическая, и экономическая категории, в том числе и формально-математическая категория [27]. Необходимо отметить, в частности, что риск как экономическая категория обуславливается группой случайных событий, каждое из которых может произойти или не произойти. При реализации конкретного события из указанной группы соответствующие оценки конечного результата на качественном уровне могут характеризовать три типа возможных экономических результатов [28]:

- отрицательный (проигрыш, ущерб, убыток);
- нулевой (статус-кво);
- положительный (выигрыш, выгода, прибыль).

По мнению авторов работы [12], риск в широком смысле – это непредсказуемость состояния системы или течения процесса как результат неполноты информации при принятии решения. При этом под обеспечением устойчивости системы подразумевается достижение достаточно низкого уровня риска, оцениваемого величиной возможных потерь, связанных с принятием решений в условиях неполной информации. Это в свою очередь требует применения процедуры управления риском. Под управлением риском понимается управление системой или процессом, неизменным атрибутом которого являются процедуры учета и оценки факторов риска в целях максимального снижения неопределенности при принятии решений и обеспечения устойчивости системы [12].

В работе [29] показано, что наиболее часто под риском понимается сочетание вероятности (частоты) нанесения ущерба и тяжести ущерба, при этом управление рисками в сложных ОТС, как правило, осуществляется в условиях нестохастической неопределенности. Эти условия характеризуются тем, что неопределенные факторы относятся к неслучайным, не обладают статистической устойчивостью и не описываются каким-либо законом распределения вероятности. Об этих факторах невозможно получить достаточно достоверной информации, а вероятность риск-событий, связанных с воздействием этих факторов, с требуемой точностью определить невозможно. Это обусловлено следующими причинами [29]:

- неполнотой и недостаточностью информации о системе;
- нечеткостью, неоднозначностью или противоречивостью выделения и описания границ системы или ее состояний, а также входных и выходных воздействий, условий ее функционирования, поведения или реакций окружающей среды;
- сложностью типизации и уникальностью оцениваемых явлений;
- сложностью оценки реального «размера» задач управления рисками;
- сложностью получения оценки вероятности проявления риска;
- зависимостью последствий риска от момента, когда риск выявлен и от возможной тяжести его последствий;
- сложностью получения точной оценки необходимых ресурсов для предотвращения или снижения риска.

Авторы работы [30] указывают на то, что риск в ОТС нельзя рассматривать в отрыве от эффективности ее функционирования. В самом общем случае эффективность – это уровень соответствия результатов какой-либо деятельности поставленным задачам, а риск – это вероятность срыва выполнения этих задач. При этом неуспех может сопровождаться и другими негативными последствиями: авариями, человеческими жертвами или материальными убытками. Чем выше эффективность, тем больше риск. Соответственно, если стараться максимально снизить риск, эффективность может оказаться на неприемлемо низком уровне. Именно поэтому в процессе управления всегда необходимо учитывать оба эти параметра. При анализе деятельности экономической системы эффективностью является приносимая прибыль, а риском – возможность понести убытки. При этом и на тот, и на другой параметр влияет множество

взаимосвязанных факторов, таких как эффективность управления, действия конкурентов, рыночная конъюнктура и т. д. [30].

Таким образом, большинством экспертов риск ассоциируется с вероятностью события либо определяется с учетом вероятности. Кроме этого, в научной литературе существуют не только различия в понимании содержания термина «риск», но и разные точки зрения по поводу объективной и субъективной природы риска. В явлении «риск» в экономических системах можно выделить следующие основные элементы, составляющие его содержание [31].

- 1) Возможность отклонения от предполагаемой цели, ради которой осуществлялась выбранная альтернатива.
- 2) Вероятность достижения желаемого результата.
- 3) Возможность материальных, нравственных и других потерь, связанных с осуществлением выбранной в условиях неопределенности альтернативы.

Анализ исследований в области создания математических моделей оценки и управления рисками экономической деятельности показал, что схожие с информационным противоборством по физическому смыслу процессы протекают в страховых организациях. Соответствующие вопросы находятся в ведении актуарной математики, формализующей процесс изменения фонда денежных средств страховой компании. При этом источниками дохода являются страховые взносы клиентов, а расходы связаны с выплатами по наступлению страховых случаев. Естественно предположить, что, во-первых, моменты наступления страховых случаев случайны и не являются последствием целенаправленных действий внешних сил, и, во-вторых, в рамках указанных моделей описаны условия как разорения страховой компании (отрицательное значение величины фонда денежных средств в определенный момент времени), так и получение прибыли на определенном промежутке времени. Таким образом, целесообразно рассмотреть возможность использования соответствующих моделей актуарной математики при формализации показателя информационного превосходства, интерпретировав процесс функционирования страховой компании в схожий процесс информационного противоборства. При такой интерпретации в качестве противостоящей стороны будут выступать застрахованные клиенты.

### **Анализ подходов к оценке и управлению рисками в информационных системах**

Оценка и управление рисками представляет собой один из основных современных разделов теории принятия решений при управлении сложными системами. Использование данной концепции обосновано особенностями построения и функционирования сложных информационной систем [32, 33]:

- многозадачность;
- сложность структуры;
- многокомпонентность;
- многочисленные протекающие процессы;
- необходимость учета большого количества параметров;
- динамичное изменение структуры;

- неполнота исходной информации;
- разнообразие воздействий рискообразующих системных и внешних факторов вероятностного и нестохастического характера;
- наличие сложных нелинейных зависимостей между параметрами;
- необходимость оперативного принятия управленческих решений;
- ограниченные возможности экспериментальных исследований;
- невозможность создания и использования общих аналитических моделей системы и процессов функционирования сложных информационной систем;
- необходимость использования различных подходов к моделированию систем и использование результатов моделирования для оперативного управления ими;
- возможность оперативного управления системами только в псевдореальном масштабе времени, обусловленном их инерционностью.

Основными этапами управления рисками в системах информационной безопасности являются [34-36]:

- идентификация угроз нарушения безопасности информационных систем;
- анализ угроз нарушения безопасности информационных систем;
- планирование мероприятий для противодействия рискам на каждом из уровней управления рисками;
- мониторинг эффективности проведения вышеуказанных мероприятий.

Как показано в работах [37-39], комплексное управление рисками нарушения безопасности информационных систем исследуется такими учеными, как А.Н. Аверкин, А.Е. Алтунин, С.В. Артюхов, О.А. Базюкин, И.З. Батыршин, А.А. Башлыкова, В.Е. Бенинг, Л.С. Берштейн, Е.В. Бодянский, А.Н. Борисов, В.В. Борисов, Ю.И. Бродский, Н.П. Бусленко, А.А. Вавилов, В.Н. Вагин, А.Н. Васильев, В.Н. Волкова, А.А. Воронов, А.И. Галушкин, Д. Дюбуа, В.В. Емельянов, А.П. Еремеев, Н.В. Замятина, А.Г. Ивахненко, В.В. Калашников, В.И. Капалин, Ю.Г. Карпов Л.Г. Комарцовой, В.Ю. Королев, А. Кофман, С.Я. Коровин, О.А. Крумберг, А.А. Кудрявцев, О.П. Кузнецов, В.М. Курейчик, Е.И. Кучеренко, Н. Г. Загоруйко, Л.А. Заде, Д.А. Тархов, С.В. Емельянов, А.И. Орлов, О.И. Ларичев, В.Г. Лисиенко, С.И. Макаренко, Е. Мамдани, А.И. Миков, А.Н. Мелихов, А.И. Михалев, Д.А. Мокогон, А.С. Нариньяни, В.В. Окольнішников, С.А. Орловский, Г.С. Осипов, Б.В. Палюх, Г.С. Плешневич, А.Б. Петровский, В.Э. Попов, Д.А. Поспелов, А. Прад, Г.В. Рыбина, Ю.И. Рыжиков, А.А. Самарский, М.В. Семухин, В.Б. Силов, В.А. Смирнов, Б.Я. Советов, В.П. Тарасик, В.Б. Тарасов, В.В. Троицкий, С. Федулов, В.К. Финн, И.Б. Фоминых, В.Ф. Хорошевский, И.И. Чуляев, Е.Э. Ширков, С.Я. Шоргин, С.А. Яковлев, Н.Г. Ярушкин, и других.

Понятие «риск информационной безопасности» появилось сравнительно недавно. До середины 90-х годов прошлого века угрозы наступления негативных событий в информационной сфере именовались угрозами безопасности информации. При этом, угрозы безопасности информации ассоциировались с негативными последствиями только для информации и информационных систем.

Понятие «информационный риск» позволяет связать негативные события в информационной подсистеме ОТС с результатами воздействия этих событий на те процессы и объекты ОТС, которые используют информацию. Такое совершенствование причинно-следственной цепочки дает возможность провести более глубокий анализ последствий от негативных событий в информационной сфере ОТС. В результате появляются новые возможности оценки информационных рисков и привлечения менеджмента предприятия к управлению этими рисками.

Таким образом, определение информационного риска может быть представлено в следующем виде. Информационный риск – это возможность наступления случайного события в информационной подсистеме ОТС, приводящего к нарушению процессов ее нормального функционирования, снижению качества информации, в результате которых наносится ущерб ОТС.

Предложенный подход к пониманию сущности информационного риска в информационных системах позволяет выделить ряд характерных особенностей информационных систем [40]:

- информационная система включает все взаимоувязанные компоненты, задействованные в процессах получения, хранения, обработки, передачи, представления и использования информации;
- эффективность информационной системы ОТС оценивается с учетом конечных результатов целевых процессов и функций ОТС;
- подсистема управления имеет возможность изменять параметры функционирования информационной подсистемы.

Наступление случайного события нарушения безопасности информационной системы связано, в первую очередь, с внешними воздействиями. Кроме того, рассмотрение информационной системы как части ОТС позволяет перейти к категории информационный риск как интегральной оценки влияния воздействий на эффективность этой ОТС в целом.

Таким образом, оценка и управление рисками в информационных системах преследуют, главным образом, цель противодействия внешнему деструктивному воздействию, предотвращению (снижению) ущерба от действий нарушителя. Соответственно, решения, принятые на основе моделей управления рисками, не способны повлиять на самого нарушителя, нанести ему урон или заставить отказаться от попытки произвести эти деструктивные воздействия. В связи с этим, актуальным направлением совершенствования научно-методического аппарата оценки и управления рисками в информационных системах должен стать учет при расчете показателя эффективности информационного противоборства действий противостоящей стороны, как системы, заинтересованной в его снижении. При формализации действий противостоящей стороны особое внимание следует уделить математическому описанию законов распределения ущерба от них, и, в дальнейшем, учесть данное описание в моделях процесса функционирования информационных систем, которые аналогичны процессам функционирования страховых компаний. Таким образом, необходимо интерпретировать моменты выплаты страховых премий клиентам как

результат целенаправленного внешнего деструктивного воздействия, в отличие от классической теории актуарной математики, где эти моменты случайны.

### Математические модели оценки и управления рисками

Анализ публикаций, имеющих в открытом доступе, показал, что математические модели, которые могут лечь в основу расчета показателя информационного превосходства, описаны в работах [41-53]. При этом стоит отметить, что автор вполне допускает возможность упущения отдельных исследований в силу различного рода обстоятельств.

Проведем анализ возможности использования в качестве основы для формализации показателя информационного превосходства динамической модель коллективного риска страховой компании, описанной в работе [41]. Текущий резерв страховой компании складывается из начального капитала  $R_0$  и страховых премий, внесенных каждым из клиентов, заключивших контракт в течение интервала времени  $[0, t]$ , за вычетом страховых выплат по страховым случаям в течение этого интервала. Пусть  $\zeta_i$  – страховой взнос  $i$ -го клиента. Тогда доход страховой компании за время  $[0, t]$  равен:

$$R_+(t) = \sum_{i=1}^{N_+(t)} \zeta_i,$$

где  $N_+(t)$  – количество контрактов, заключенных за время  $[0, t]$ .

Пусть  $X_j, j \geq 1$  – последовательности моментов и размеров страховых выплат. Тогда суммарные потери страховой компании за время  $[0, t]$  будут равны:

$$R_-(t) = \sum_{j=1}^{N_-(t)} X_j.$$

Таким образом, «динамическая компонента» резерва страховой компании в момент времени  $t$  равна

$$R_d(t) = R_+(t) - R_-(t) = \sum_{i=1}^{N_+(t)} \zeta_i - \sum_{j=1}^{N_-(t)} X_j. \quad (1)$$

Процесс

$$R(t) = R_0 + R_d(t),$$

где  $R_d(t)$  определяется соотношением (1), называют процессом риска. Момент разорения  $\tau$  определяется как:

$$\tau = \inf \{t: R_0 + R_d(t) < 0\}. \quad (2)$$

где  $\inf(t)$  – наименьшее значение  $t$  из множества  $\{t\}$ , иными словами момент времени, когда значение величины резерва страховой компании впервые становится отрицательным.

Поскольку процесс  $R_+(t)$ , а также величины  $T_i, i \geq 1$  и  $X_j, j \geq 1$ , предполагаются случайными, то и процесс риска  $R(t)$ , и момент разорения  $\tau$  также случайны, причем в задачах, представляющих практический интерес, случайная величина  $\tau$  является несобственной в том смысле, что  $P(\tau < 0) < 1$ .

Величина:

$$\beta(R_0) = P(\tau < \infty | R(0) = R_0)$$

называется вероятностью разорения на бесконечном промежутке времени при начальном капитале  $R_0$ . Пусть  $t \geq 0$ . Тогда величина

$$\beta(\tau, R_0) = P(\tau \leq t | R(0) = R_0) \quad (3)$$

называется вероятностью разорения на конечном промежутке времени  $[0, t]$  при начальном капитале  $R_0$ .

Выражение для вероятности неразорения имеет вид:

$$v(\tau, R_0) = 1 - \beta(\tau, R_0). \quad (4)$$

Развитие моделей риска страховой компании сопряжено с предположением о виде процессов  $N_+(t)$  и  $N_-(t)$  как однородных пуассоновских с некоторыми интенсивностями  $\lambda_+$  и  $\lambda_-$  соответственно. Данное предположение позволяет описать случайный процесс получения дохода страховой компании  $R_+(t)$  линейной функцией:

$$R_+(t) \approx b\lambda_+t, \quad (5)$$

где  $b$  – математическое ожидание размера страхового взноса  $i$ -го клиента  $\zeta_i$ .

Таким образом, процесс риска страховой компании описывается выражением:

$$R(t) = R_0 + ct - \sum_{k=1}^{N_-(t)} X_k, \quad t \geq 0, \quad (6)$$

где  $c > 0$ ,  $N_-(t)$  – моменты выплат страховых премий,  $X_k$ ,  $k=1, \dots, N_-(t)$  – независимые случайные величины выплат страховых премий с функцией распределения  $F(X_k)$  такой, что  $F(0)=0$ .

Процесс риска страховой компании, описываемый выражением (6), в актуарной математике называют процессом риска Спарре Андерсена.

Формализация показателя информационного превосходства предусматривает следующую интерпретацию описанной исходной модели.

Под резервом компании следует понимать временное преимущество, полученное в ходе выполнения мероприятий цикла управления. Величины  $\zeta_i$  и  $X_j$  – прирост временного превосходства стороны 1 (стороны 2) вследствие  $i$ -го ( $j$ -го) информационного контакта с объектами информационного пространства стороны 2 (стороны 1). Значение  $R_0$  – начальное временное преимущество стороны 1. Под значениями  $N_+(t)$  и  $N_-(t)$  следует понимать общее количество информационных контактов стороны 1 (стороны 2). Показателем информационного превосходства является величина  $v(\tau, R_0)$  (4), отображающая вероятность того, на определенном интервале времени  $\tau$ , который отображает длительность цикла управления, сторона 1 будет иметь временное превосходство над стороной 2. Соответственно,  $\beta(\tau, R_0)$ , определяемое выражением (3), – обратная относительно  $v(\tau, R_0)$  величина, показывающая вероятность отсутствия временного превосходства стороны 1 над стороной 2. Следует отметить, что в полной вероятности исхода информационного противоборства

должна присутствовать величина вероятности равенства сторон по приросту временного превосходства с учетом начального преимущества стороны 1 ( $R_0 > 0$ ), стороны 2 ( $R_0 < 0$ ) или отсутствия преимущества у каждой из сторон ( $R_0 = 0$ ). Таким образом, с учетом принятой интерпретации процесс информационного противоборства будет описываться выражением

$$R_d(t) = R_0 + \sum_{i=1}^{N_+(t)} \zeta_i - \sum_{j=1}^{N_-(t)} X_j.$$

Показатель информационного превосходства, определяемый выражением (4), нуждается в дальнейшей адаптации в целях адекватного отображения цели ведения информационного противоборства. Так, момент разорения  $\tau$ , определяемый выражением (2), обозначает момент, в который резерв страховой компании впервые становится отрицательным. Вместе с тем, применительно к процессу информационного противоборства получение одной сторон временного преимущества на определенном этапе цикла управления не означает достижения информационного превосходства на этом цикле в целом. Кроме того, предположение о пуассоновском распределении плотности вероятностей поступления страховых премий и наступления моментов страховых выплат, позволяющее существенно упростить описание процесса риска страховой компании, нуждается в дополнительном анализе на предмет возможности его использования при описании количества информационных контактов каждой из сторон в ходе информационного противоборства. Как показано в работах [42-53], распределение плотности вероятностей ущерба систем вследствие действий нарушителя может характеризоваться различными законами. Нахождение закона распределения для плотности вероятностей как количества информационных контактов сторон, так и временного преимущества, полученного ими в результате этих контактов, является крайне интересным развитием моделей процесса риска страховой компании применительно к формализации показателя информационного превосходства.

### Заключение

Проведенный анализ показал, что искомые для формализации показателя информационного превосходства математические модели должны включать в себя как подходы, принятые в актуарной математике для описания процесса функционирования страховой компании, так и элементы математической теории оценки и управления рисками в информационных системах. Подобный симбиоз делает возможным описание информационного противоборства как двустороннего процесса, с оценкой вероятности получения временного преимущества для каждой из сторон.

Новизной такого подхода является взаимосвязь показателя информационного превосходства, в общем виде определяемого выражением (4), с показателями эффективности подсистем РМ и РЭБ – прироста временного превосходства вследствие общего количества информационных контактов с объектами информационного пространства противостоящей стороны. Определение законов распределения для плотности вероятностей этих величин позволит

формализовать оптимальное количество информационных контактов из  $N_+(t)$  для каждой из подсистем РМ и РЭБ в целях максимизации величины временного превосходства на цикле управления  $\sum_{i=1}^{N_+(t)} \zeta_i$  и, следовательно, показателя информационного превосходства  $v(\tau, R_0)$  в целом.

### Литература

1. Донсков Ю. Е., Зимарин В. И., Илларионов Б. В. Подход к построению систем радиоэлектронной борьбы в условиях реализации сетевых концепций развития вооруженных сил // Военная мысль. 2015. № 2. С. 40-48.
2. Выпасняк В. И., Гуральник А. М., Тиханычев О. В. Система поддержки принятия решений как «виртуальный штаб» // Военная мысль. 2015. № 2. С. 23-29.
3. Воробьев И. Н., Киселев В. А. Киберпространство как сфера непрямого вооруженного противоборства // Военная мысль. 2014. № 12. С. 21-28.
4. Скоков С. И., Грушка Л. В. Влияние концепции сетецентризма на эволюцию и функционирование системы управления Вооруженными Силами Российской Федерации // Военная мысль. 2014. № 12. С. 33-41.
5. Кузнецов В. И., Донсков Ю. Е., Никитин О. Г. К вопросу о роли и месте киберпространства в современных боевых действиях // Военная мысль. 2014. № 3. С. 13-17.
6. Богданов А. Е., Попов С. А., Иванов М. С. Перспективы ведения боевых действий с использованием сетевых технологий // Военная мысль. 2014. № 3. С. 3-12.
7. Антонович П. И., Макаренко С. И., Михайлов Р. Л., Ушанев К. В. Перспективные способы деструктивного воздействия на системы военного управления в едином информационном пространстве // Вестник Академии военных наук. 2014. № 3 (48). С. 93-101.
8. Троценко К. А. Информационное противоборство в оперативно-тактическом звене управления // Военная мысль. 2016. № 8. С. 20-25.
9. Михайлов Р. Л. Анализ научно-методического аппарата теории координации и его использования в различных областях исследований // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 4. С. 1-29. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2016-04/01-Mikhailov.pdf> (дата обращения 05.12.2017).
10. Черноруцкий И. Г. Методы принятия решений. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.
11. Антонова А. С., Аксенов К. А. Многокритериальное принятие решений в условиях риска на основе интеграции мультиагентного, имитационного, эволюционного моделирования и численных методов // Инженерный вестник Дона. 2012. Т. 23. № 4-2. С. 99.
12. Горелик В. А., Золотова Т. В. Общий подход к моделированию процедур управления риском и его применение к стохастическим и

иерархическим системам // Управление большими системами: сборник трудов. 2012. № 37. С. 5-24.

13. Болдырева Н. Б. Стоимостный подход интегрированному управлению рисками коллективного инвестиционного фонда. Диссертация ... докт. экон. наук: 08.00.10. – Екатеринбург: Уральский государственный экономический университет, 2011. – 317 с.

14. Хрусталева Б., Вяцкая Н. Концептуальные и научные подходы к управлению рисками предприятий строительного комплекса // РИСК: Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция. 2014. № 2. С. 260-265.

15. Милль Дж. С. Основы политической экономии. – М.: Прогресс, 1981.

16. Райзберг Б. А. Предпринимательство и риск. – М.: Знание, 1992. – 64 с.

17. Хохлов Н. В. Управление риском. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 1999. – 239 с.

18. Грачева М. В. Анализ проектных рисков. – М.: Финстатинформ, 1999. – 216 с.

19. Чернова Г. В., Кудрявцев А. А. Управление рисками. – М.: Проспект, 2008. – 160 с.

20. Альгин А. П. Риск и его роль в общественной жизни. – М.: Мысль, 1989. – 187 с.

21. Шапкин А. С. Экономические и финансовые риски. Оценка, управление, портфель инвестиций. – М.: Дашков и Ко, 2003. – 544 с.

22. Воронцовский А. А. Управление рисками. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2004. – 458 с.

23. Рыхтикова Н. А. Анализ и управление рисками организации. – М.: ИНФРА-М, 2007. – 240 с.

24. Порфирьев Б. Н. Концепция риска, который никогда не равен нулю // Энергия. 1989. № 8. С. 31-33.

25. Ступаков В. С., Токаренко Г. С. Риск-менеджмент. – М.: Финансы и статистика, 2005. – 288 с.

26. New Webster's Dictionary of the English Language. College Edition. – Delhi: Subject Publications, 1999.

27. Балабанов И. М. Риск-менеджмент. – М.: Финансы и статистика, 1996. – 313 с.

28. Доля В. К., Лежнева Е. И. К управлению рисками в системах логистики // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. 2008. № 25. С. 149-151.

29. Сеньков А. В., Борисов В. В., Боряков А. В., Гаврилов А. И. Подход к управлению рисками в сложных организационно-технических системах // Вестник МЭИ. 2013. № 5. С. 156-161.

30. Алексеев В. В., Соложенцев Е. Д. Логико-вероятностный подход к управлению риском и эффективностью в структурно-сложных системах // Информационно-управляющие системы. 2009. № 6. С. 67-71.

31. Ключкова Н. В. Управление финансовыми рисками как инструмент управления финансовыми ресурсами энергетических компаний // Финансы и кредит. 2007. № 22 (262). С. 45-49

32. Аветисян А. И., Белеванцев А. А., Чукляев И. И. Технологии статического и динамического анализа уязвимостей программного обеспечения // Вопросы кибербезопасности. 2014. № 3 (4). С. 20-28.

33. Морозов А. В., Майбуров Д. Г., Чукляев И. И. Информационное оружие: теория и практика применения // Проблемы безопасности российского общества. 2014. № 2. С. 177-183.

34. ГОСТ Р 51897–2002 Менеджмент риска. Термины и определения. Издания. Международный стандартный книжный номер. Использование и издательское оформление. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 5 с.

35. Макаренко С. И., Чукляев И. И. Терминологический базис в области информационного противоборства // Вопросы кибербезопасности. 2014. № 1 (2). С. 13-21.

36. Чукляев И. И. Управление рисками защищенности распределенных информационно-вычислительных систем // Системы компьютерной математики и их приложения. 2015. № 16. С. 110-112.

37. Чукляев И. И. Метод и модели комплексного управления рисками нарушения защищенности информационно-управляющих систем. Монография. – Смоленск: ВА ВПВО ВС РФ, 2015. – 141 с.

38. Борисов В. В., Круглов В. В., Федулов А. С. Нечеткие модели и сети. Монография. – М: Горячая линия - Телеком, 2012. – 284 с.

39. Чукляев И. И. Научно-методическое обеспечение комплексного управления рисками нарушения защищенности функционально-ориентированных информационных ресурсов информационно-управляющих систем // Вопросы кибербезопасности. 2016. № 4 (17). С. 61-71.

40. Завгородний В. И. Информационные риски и информационные системы // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2008. № 1. С. 138-140.

41. Королев В. Ю., Бенинг В. Е., Шоргин С. Я. Математические основы теории риска. – М.: Физматлит, 2011. – 591 с.

42. Остапенко А. Г. Методика расчета риска и его параметров для дискретных распределений вероятностей ущерба // Информация и безопасность. 2006. № 1. С. 124-126.

43. Остапенко О. А. Методика оценки параметров риска с применением непрерывных распределений вероятностей ущерба // Информация и безопасность. 2006. № 4. С. 55-58.

44. Остапенко А. Г., Афанасьев А. С., Железняк В. П. Функции относительной чувствительности риска к изменению параметров безопасности для распределения Маркова-Поя // Информация и безопасность. 2007. № 1. С. 559-564.

45. Остапенко О. А., Нартов А. Н., Боев С. А. Непрерывное Бета-распределение плотности вероятностей ущерба систем при оценке их рисков и защищенности // Информация и безопасность. 2006. № 2. С. 94-97.

46. Остапенко О. А., Барабанщиков И. П., Сазонова Е. А. Оценка рисков и защищенности систем для непрерывного U-распределения плотности вероятностей ущерба защищенности // *Информация и безопасность*. 2006. № 2. С. 86-89.

47. Остапенко Г. А., Казьмин О. А., Субботина Е. В., Пентюхин А. В. Методика оценки защищенности для пуассоновского дискретного распределения вероятностей ущерба от компьютерных атак // *Информация и безопасность*. 2006. № 1. С. 100-103.

48. Линец А. Л., Остапенко О. А., Кобышев В. Г., Субботина Е. В., Назаров А.Н. Безопасность систем при Коши-распределении плотности вероятностей их ущерба // *Информация и безопасность*. 2006. № 1. С. 96-99.

49. Остапенко А. Г., Попова Е. В. Чувствительность нормированного риска для величины вероятности ущерба, распределенной по закону Паскаля // *Информация и безопасность*. 2007. № 3. С. 503-506.

50. Субботина Е. В., Остапенко О. А., Александров И. С. Логарифмическое нормальное распределении плотностей вероятностей ущерба систем в задачах оценки рисков и их защищенности // *Информация и безопасность*. 2006. № 2. С. 98-101.

51. Паниткин Д. В., Щербаков В. Б. Оценка риска и защищенности систем для гипергеометрического дискретного распределения вероятностей ущерба защищенности // *Информация и безопасность*. 2007. № 3. С. 515-518.

52. Андреев Д. А., Остапенко А. Г., Филиппов Ю. Е. К вопросу о принятии решения при управлении риском // *Информация и безопасность*. 2007. № 3. С. 469-474.

53. Остапенко Г. А., Карпеев Д. О., Плотников Д. Г., Батищев Р. В., Гончаров И. В., Маслихов П. А., Мешкова Е. А., Морозова Н. М., Рязанов С. А., Субботина Е. В., Транин В. А. Риски распределенных систем: методики и алгоритмы оценки и управления // *Информация и безопасность*. 2010. № 4. С. 485-530.

## References

1. Donskov Y. E., Zimarin V. I., Illarionov B. V. An Approach to Construction of Electronic Warfare System in the Conditions of Realized Network-Centric Concepts of the Armed Forces' Development. *Military Thought*, 2015, no. 2, pp. 40-48 (in Russian).

2. Vypasnyak V. I., Guralnik A. M., Tikhanychev O. V. Decision Support System as a «Virtual Headquarters». *Military Thought*, 2015, no. 2, pp. 23-29 (in Russian).

3. Vorobyov I. N, Kiselyov V. A. Cyberspace as a Sphere of Indirect Armed Confrontation. *Military Thought*, 2014, no. 12, pp. 21-28 (in Russian).

4. Skokov S. I., Grushka L. V. Influence of Network Centric Concept on Evolution and Functioning of the Control System of the Armed Forces of the Russian Federation. *Military Thought*, 2014, no. 12, pp. 33-41 (in Russian).

5. Kuznetsov V. I., Nikitin O. G. On the Role of Cyberspace in Modern Warfare. *Military Thought*, 2014, no. 3, pp. 13-17 (in Russian).

6. Bogdanov A. Ye., Popov S. A., Ivanov M. S. Prospects of Warfare Using Network-Centric Technologies. *Military Thought*, 2014, no. 3, pp. 3-12 (in Russian).

7. Antonovich P. I., Makarenko S. I., Mihailov R. L., Ushanev K. V. New Means of Destructive Effects on Network Centric Military Command, Control and Communication Systems in the Common Information Space. *Vestnik Akademii voennykh nauk*, 2014, no. 3, pp. 93-101 (in Russian).

8. Trotsenko K. A. Information Warfare at the Operational-Tactical Level of Control. *Military Thought*, 2016, no. 8, pp. 20-25 (in Russian).

9. Mikhailov R. L. An Analysis of the Scientific and Methodological Apparatus of Coordination Theory and its Use in Various Fields Of Study. *Systems of Control, Communication and Security*, 2016, no. 4, pp. 1-29. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2016-04/01-Mikhailov.pdf> (accessed 18 September 2017) (in Russian).

10. Chernorutskii I. G. *Metody priniatiia reshenii* [Methods of Decision Making]. Saint-Peterburg, BKhV-Peterburg Publ, 2005. 416 p. (in Russian)

11. Antonova A. S., Aksenov K. A. Mnogokriterial'noe priniatie reshenii v usloviakh riska na osnove integratsii mul'tiagentnogo, imitatsionnogo, evoliutsionnogo modelirovaniia i chislennykh metodov [Multi-Criteria Decision-Making under Risk Based on the Integration of Multi-Agent, Simulation, Evolutionary Modeling and Numerical Methods]. *Engineering journal of Don*, 2012, no 4-2. vol. 23. p. 99 (in Russian).

12. Gorelik V. A., Zolotova T. V. Obshchii podkhod k modelirovaniu protsedur upravleniia riskom i ego primenenie k stokhasticheskim i ierarkhicheskim sistemam [General Approach to Modeling of Risk Management Procedures and Its Application to Stochastic and Hierarchical Systems]. *Large-scale Systems Control*, 2012, no 37, pp. 5-24 (in Russian).

13. Boldyreva N. B. *Stoimostnyi podkhod integrirovannomu upravleniiu riskami kollektivnogo investitsionnogo fonda*. Dis. dokt. ekon. nauk [The Cost Approach to Integrated Risk Management of a Collective Investment Fund. Ph.D. Tesis]. Ekaterinburg, Ural State University of Economics, 2011. 317 p. (in Russian).

14. Khrustalev B., Viatskaia N. Kontseptual'nye i nauchnye podkhody k upravleniiu riskami predpriatii stroitel'nogo kompleksa [The Conceptual and Scientific Approaches to the Risk Management of Construction Enterprises]. *RISK: Resursy, Informatsiia, Snabzhenie, Konkurentsii*, 2014, no 2, pp. 260-265 (in Russian).

15. Mill J. S. *Fundamentals of political economy*. London, 1848.

16. Raizberg B. A. *Predprinimatel'stvo i risk* [Entrepreneurship and Risk]. Moscow, Znanie Publ., 1992. 64 p. (in Russian).

17. Khokhlov N. V. *Upravlenie riskom* [Management Risk]. Moscow, IuNITI-DANA Publ., 1999. 239 p. (in Russian).

18. Gracheva M. V. *Analiz proektnykh riskov* [Analysis of Design Risks]. Moscow, Finstatinform Publ., 1999. 216 p. (in Russian).

19. Chernova G. V., Kudriavtsev A. A. *Upravlenie riskami* [Management of Risks]. Moscow, Prospekt Publ., 2008. 160 p. (in Russian).

20. Al'gin A. P. *Risk i ego rol' v obshchestvennoi zhizni* [Risk and its Role in Public Life]. Moscow, Mysl' Publ., 1989. 187 p. (in Russian).
21. Shapkin A. S. *Ekonomicheskie i finansovye riski. Otsenka, upravlenie, portfel' investitsii* [Economic and Financial Risks. Evaluation, Management, Investment Portfolio]. Moscow, Dashkov i Ko Publ., 2003. 544 p. (in Russian).
22. Vorontsovskii A. A. *Upravlenie riskami* [Management of Risks]. Moscow, IuNITI-DANA Publ., 2004. 458 p. (in Russian).
23. Rykhtikova N. A. *Analiz i upravlenie riskami organizatsii* [Analysis and Risk Management of the Organization]. Moscow, INFRA-M Publ., 2007. 240 p. (in Russian).
24. Porfir'ev B. N. Kontsepsiia riska, kotoryi nikogda ne raven nuliu [The Concept of Risk, Which is Never Equal to Zero]. *Energiia*, 1989, no 8, pp. 31-33 (in Russian).
25. Stupakov V. S., Tokarenko G. S. *Risk-menedzhment* [Risk Management]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2005. 288 p. (in Russian).
26. New Webster's Dictionary of the English Language. College Edition. Delhi, Subject Publications, 1999.
27. Balabanov I. M. *Risk-menedzhment* [Risk Management]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1996. 313 p. (in Russian).
28. Dolia V. K., Lezhneva E. I. K upravleniiu riskami v sistemakh logistiki [To Risk Management in Logistics Systems]. *Visnik Dnipropetrovs'kogo natsional'nogo universitetu zaliznichnogo transportu im. akademika V. Lazariana*, 2008, no. 25, pp. 149-151 (in Russian).
29. Sen'kov A. V., Borisov V. V., Boriakov A. V., Gavrilov A. I. Podkhod k upravleniiu riskami v slozhnykh organizatsionno-tekhnicheskikh sistemakh [The Approach to Risk Management in Complex Organizational and Technical Systems]. *Vestnik MEI*, 2013, no 5, pp. 156-161 (in Russian).
30. Alekseev V. V., Solozhentsev E. D. A Logical and Probabilistic Approach to Risk and Efficiency Management in Structural Complex Systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2009, no 6, pp. 67-71 (in Russian).
31. Klochkova N.V. Financial Risk Management as a Tool for Managing the Financial Resources of Energy Companies. *Finance and credit*, 2007, vol. 262, no. 22, pp. 45-49 (in Russian).
32. Avetisian A. I., Belevantsev A. A., Chukliaev I. I. Technologies for Static and Dynamic Analysis of Software Vulnerabilities. *Voprosy kiberbezopasnosti*, 2014, vol. 4, no. 3, pp. 20-28 (in Russian).
33. Morozov A. V., Maiburov D. G., Chukliaev I. I. Informatsionnoe oruzhie: teoriia i praktika primeneniia [Information Weapons: Theory and Practice of Application]. *Problemy bezopasnosti rossiiskogo obshchestva*, 2014, no 2, pp. 177-183 (in Russian).
34. State Standard of Russia 51897–2002. Management of Risk. Terms and Definitions. Moscow, Standartov Publ., 2002. 5 p. (in Russian).
35. Makarenko S. I., Chucklyayev I. I. The Terminological Basis of the Informational Conflict Area. *Voprosy kiberbezopasnosti*, 2014, vol. 2, no. 1, pp. 13-21 (in Russian).

36. Chukliaev I. I. Upravlenie riskami zashchishchennosti raspredelennykh informatsionno-vychislitel'nykh sistem [Management of security risks of distributed information and computing systems]. *Sistemy komp'iuternoï matematiki i ikh prilozheniia*, 2015, no. 16, pp. 110-112 (in Russian).

37. Chukliaev I. I. *Metod i modeli kompleksnogo upravleniia riskami narusheniia zashchishchennosti informatsionno-upravliaiushchikh sistem. Monografiia* [The Method and Models of Complex Risk Management for the Violation of Information Management Systems. Monography]. Smolensk, Military Academy of Anti-Aircraft Defense Publ., 2015, 141 p. (in Russian).

38. Borisov V. V., Kruglov V. V., Fedulov A. S. *Nechetkie modeli i seti*. [Fuzzy models and networks. Monography]. Moscow, Goryachaya liniya-Telecom Publ, 2012. 284 p. (in Russian).

39. Chukliaev I. I. Nauchno-metodicheskoe obespechenie kompleksnogo upravleniia riskami narusheniia zashchishchennosti funktsional'no-orientirovannykh informatsionnykh resursov informatsionno-upravliaiushchikh sistem [Scientific and Methodical Support of Complex Risk Management for the Violation of the Protection of Functionally-Oriented Information Resources of Information-Control Systems]. *Voprosy kiberbezopasnosti*, 2016, vol. 17, no. 4, pp. 61-71 (in Russian).

40. Zavgorodnii V. I. Informatsionnye riski i informatsionnye sistemy [Information Risks and Information Systems]. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve*, 2008, no 1, pp. 138-140 (in Russian).

41. Korolev V. Iu., Bening V. E., Shorgin S. Ia. *Matematicheskie osnovy teorii riska* [Mathematical Foundations of the Theory of Risk]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2011. 591 p. (in Russian).

42. Ostapenko A. G. Methods of Calculation of Risks and Their Parametres for Discrete Damage Probability Distributions. *Information and Security*, 2006, no. 1, pp. 124-126 (in Russian).

43. Ostapenko O. A. Methods of Assessment of Risks Parameters Using Continuous Damage Probabilities. *Information and Security*, 2006, no. 4. pp. 55-58 (in Russian).

44. Ostapenko A. G., Afanas'ev A. S. Zhelezniak V. P. The Functions of Relative Sensitivity of Risk for Variation of Systems Security Parameters for Markov-Polya's Distribution. *Information and Security*, 2007, no. 1, pp. 559-564 (in Russian).

45. Ostapenko O. A., Nartov A. N., Boev S. A. Continuous Beta-Distribution of the Density of System Damage Probabilities when Assessing its Risks and Proofness. *Information and Security*, 2006, no. 2, pp. 94-97 (in Russian).

46. Ostapenko O. A., Barabanshchikov I. P., Sazonova E. A. Assessment of Risks and Proofness of the Systems for Continuous Normal Selective U-Distribution of the Density of Damage Probabilities. *Information and Security*, 2006, no. 2, pp. 86-89 (in Russian).

47. Ostapenko G. A., Kaz'min O. A., Subbotina E. V., Pentiukhin A. V. Method of Proofness Assessment for the Poisson Discrete Distribution of Damage Probabilities in Computer Attacks. *Information and Security*, 2006, no. 1. pp. 100-103 (in Russian).

48. Linets A. L., Ostapenko O. A., Kobyshev V. G., Subbotina E. V., Nazarov A. N. The Systems Security in the Case of Cauchy-Distribution of Their Damage Probabilities Density. *Information and Security*, 2006, no. 1, pp. 96-99 (in Russian).

49. Ostapenko A. G., Popova E. V. The Sensitivity of the Normalized Risk for the Damage Probability by the Pascal Distribution. *Information and Security*, 2007, no. 3, pp. 503-506 (in Russian).

50. Subotina E. V., Ostapenko O. A., Aleksandrov I. S. Logarithmically Normal Continuous Distribution of the Density of Damage Probabilities in the Tasks of Assessment of Risks and Systems Proofness. *Information and Security*, 2006, no. 2, pp. 98-101 (in Russian).

51. Panitkin D. V., Shcherbakov V. B. The Assessment of Risks and Security of Systems for Hyper Geometric Distribution of Probabilities of Damage Occurrence. *Information and Security*, 2007, no. 3. pp. 515-518 (in Russian).

52. Andreev D. A., Ostapenko A. G., Filippov Iu. E. On the Issue of Decision-Making for Risk Management. *Information and Security*, 2007, no. 3, pp. 469-474 (in Russian).

53. Ostapenko G. A., Karpeev D. O., Plotnikov D. G., Batishchev R. V., Goncharov I. V., Maslihov P. A., Meshkova E. A., Morozova N. M., Ryazanov S. A., Subbotina E. V., Tranin V. A. Risks of the Distributed Systems: Techniques and Algorithms of the Estimation of Management. *Information and Security*, 2010, no. 4. pp. 485-530 (in Russian).

**Статья поступила 9 декабря 2017 г.**

### **Информация об авторе**

*Михайлов Роман Леонидович* – кандидат технических наук. Научно-педагогический работник. Череповецкое высшее военное инженерное училище радиоэлектроники. Область научных интересов: информационное противоборство, маршрутизация информационных потоков, координация подсистем наблюдения и воздействия. E-mail: [mikhailov-rom2012@yandex.ru](mailto:mikhailov-rom2012@yandex.ru)

Адрес: 162622, Вологодская обл., г. Череповец, Советский пр., д. 126.

## Analysis of Approaches to the Formalization of the Indicator of Information Superiority Based on the Theory of Assessment and Risk Management

R. L. Mikhailov

**Relevance.** Present time, in the armed forces of developed countries, there is a steady trend towards the introduction of the concept of combat management in a network-centric manner. An inherent attribute of this concept is information warfare, that is, a bilateral conflict in the information sphere, which is entrusted to the command, radio monitoring and electronic warfare subsystems at the tactical and operational levels of control. At the same time, the well-known author does not have a formal description of the index of information superiority - a key indicator of the effectiveness of information warfare, which would link the performance indicators of each of these subsystems. **The aim of this paper** is the analysis of mathematical models of the theory of assessment and risk management for their use in a new subject area - in the field of information warfare. **Methods used.** The solution of the problem is based on the use of methods of system analysis, as well as methods of induction and deduction of the theory of logic. **Result.** Based on the analysis of more than 50 sources, the features of mathematical assessment and management of risks in the economic sphere and in the field of information systems security are revealed. Mathematical models that can form the basis for the formalization of the information superiority index are analyzed, ways of their improvement are shown in the interests of an adequate display of the information confrontation process. **Novelty.** The element of novelty of work is the determination of the need to take into account the purposeful actions of the opposing party in the course of information warfare on the basis of a mathematical apparatus in the field of ensuring the security of information systems, as well as taking into account the playful nature of its conduct and, accordingly, models of risk assessment and management in economic systems, which allow to assess both the possible income due to management decisions and the loss in assets. **Practical significance.** The presented analysis can be used by specialists to justify new technological solutions in the field of information warfare, as well as by military specialists - to justify new forms and methods of organizing the interaction of diverse forces and means in the conduct of armed struggle. In addition, this analysis will be useful to researchers and job seekers conducting scientific research in the field of coordination in complex multi-level control systems.

**Key words:** risk assessment, risk management, information warfare, information superiority, network-centric principle.

### Information about Author

Roman Leonidovich Mikhailov – Ph.D. of Engineering Sciences. Scientific and pedagogical worker. Cherepovets Higher Military Engineering School of Radio Electronics. Field of research: information warfare, routing of data flow, unified influence of monitoring and rejection means on communication networks. E-mail: mikhailov-rom2012@yandex.ru

Address: Russia, 162622, Vologda region, Cherepovets, Sovetskiy prospect, 126.

УДК 378, 004.942

## Разработка информационной образовательной среды на базе конвергентного подхода

Деев М. В., Кравец А. Г., Финогеев А. Г.

**Постановка задачи:** в статье анализируются проблемы проектирования интеллектуальной образовательной среды. Среда является необходимой для управления процессами конвергентного образования и повышения квалификации специалистов. **Целью работы** является обеспечение взаимодействия жизненных циклов основных компонент, а именно электронных образовательных ресурсов, образовательных программ и уровней квалификации. **Используемые методы:** процесс конвергенции в образовательной среде определяет единство компетенций, которые необходимы для специалистов разных специальностей и уровней квалификации. Конвергентная модель также предлагается для взаимодействия основных компонент. **Новизна:** модель предполагает глубокую интеграцию образовательных и информационных технологий на базе единой сетевой платформы, которая включает систему управления образовательным контентом, систему управления учебной деятельностью, систему управления обучением, систему оценки знаний, интеллектуальную систему анализа требований работодателей, систему прогнозирования потребностей рынка труда, Web интерфейс и т.д. **Практическая значимость:** интеллектуальная образовательная среда представляет механизм интеграции и синхронизации образовательных ресурсов и обучающих систем для поддержки процессов сближения технологий электронного, мобильного, облачного, смешанного и повсеместного обучения.

**Ключевые слова:** конвергенция, квалификация, специалист, интеллектуальная образовательная среда, образовательная программа, жизненный цикл, электронный образовательный ресурс, конвергентное образование.

### Введение

В настоящий момент для поддержки согласования информации между системой образования и рынком труда необходима комплексная организация системы подготовки, переподготовки и информационного сопровождения специалистов на основе современных образовательных технологий, что невозможно без решения проблемы массового создания и модернизации электронных образовательных ресурсов (ЭОР). Массовая разработка и актуализация ЭОР требуют много времени и ресурсов, поэтому необходимо совершенствовать подходы к реализации и эволюции ЭОР на основе применения моделей жизненного цикла (ЖЦ) [1, 2].

В современном мире набирают большую популярность технологии автоматизированного управления процессом обучения и подготовки специалистов. Они позволяют быстро и сравнительно недорого создавать новые образовательные программы (ОП) и технологии с обеспечением удаленного доступа

---

#### Библиографическая ссылка на статью:

Деев М. В., Кравец А. Г., Финогеев А. Г. Разработка информационной образовательной среды на базе конвергентного подхода // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 3. С. 119-134. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-03/06-Deev.pdf>

#### Reference for citation:

Deev M. V., Kravets A. G., Finogeev A. G. Development of an information educational environment based on a convergent approach. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 3, pp. 119-134. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-03/06-Deev.pdf> (in Russian).

преподавателей и обучающихся к единой информационной среде, интегрированной с глобальным Интернет пространством.

На рынке образовательных программных продуктов предлагается большое количество систем управления учебной деятельностью (Learning Management System – LMS) [3]. Такие системы применяются для разработки, интеграции, распространения и актуализации учебных, методических, нормативных и педагогических материалов с поддержкой возможности дистанционного, повсеместного и мобильного доступа в онлайн-режиме. В качестве учебных материалов LMS системы используют ЭОР, которые включают структуру, предметное содержание (контент) и метаданные [4-6]. В связи с большим числом ЭОР и существующей тенденцией к их росту возникает актуальная задача минимизации затрат на их разработку, а также на их модификацию и актуализацию в процессе сопровождения.

К основным проблемам современной подготовки специалистов с использованием ЭОР относятся [7-10]:

- 1) отсутствие моделей ЖЦ для ЭОР, ОП и уровней квалификации специалистов, обеспечивающих комплексную автоматизацию процесса управления учебной деятельностью в единой информационной среде;
- 2) недостаточное соответствие ОП и контента ЭОР современным требованиям работодателей;
- 3) отсутствие эффективных инструментальных средств для создания, актуализации и сопровождения ЭОР в информационной среде;
- 4) отсутствие интеллектуальных средств анализа требований работодателей для синтеза набора требуемых компетенций;
- 5) отсутствие технологии автоматизации процесса согласования ОП с требованиями работодателей и имеющимися ЭОР в информационной среде.

Целью создания открытой платформы для синхронизации образовательных ресурсов, требований стандартов и работодателей является согласование и обеспечение процесса взаимодействия ЖЦ ЭОР, ОП и уровней квалификации обучаемых. Для достижения поставленной цели сформулированы задачи: разработки схемы и модели синхронизации ЖЦ, разработки и программной реализации методики синхронизации и согласования ЭОР по различным направлениям подготовки, способа анализа вариантов реализации компонентов интеллектуальной информационно-образовательной среды (ИИОС) для поддержки технологий массовой разработки и актуализации учебных программ и ресурсов.

В статье рассматриваются технологии проектирования информационной образовательной среды для поддержки управления процессами непрерывной подготовки специалистов на основе конвергентного подхода.

### **Разработка модели информационной образовательной среды на основе конвергентного подхода**

Научно-технический прогресс и процесс эволюции информационно-технологических платформ вызывают необходимость быстрой актуализации учебно-методических комплексов. Процессы непрерывной подготовки специа-

листов, создания и развития ОП, ЭОР при постоянно меняющихся требованиях образовательных стандартов и работодателей тесно связаны и требуют комплексной синхронизации и автоматизации для повышения качества образования. Тенденции в системе образования направлены на внедрение и использование:

- 1) мобильных устройств (ноутбуки, смартфоны, планшеты, Smart Watch и GoogleGlass) и технологий мобильного обучения;
- 2) технологий облачного обучения (инструменты GoogleClassroom, Moodle, Blackboard, «Мобильная Электронная Школа» и др.);
- 3) социальных сетей для взаимодействия преподавателей и обучающихся;
- 4) технологии смешанного обучения в реальных аудиториях и виртуальной среде;
- 5) технологий геймификации для реализации игровой формы учебного процесса.

Новые технологии определяют конвергентную модель интеллектуальной образовательной среды (Smart Learning Environment – SLE) для интеграции и синхронизации гетерогенных образовательных ресурсов и обучающих систем в рамках поддержки технологий электронного (e-learning), мобильного (m-learning), облачного (cloud learning), смешанного (blended learning) и повсеместного обучения (ubiquitous education). Необходимость исследований в данной области знаний определяется эволюционным развитием информационных и телекоммуникационных технологий в направлении развития всепроникающих сетей и технологий повсеместного доступа 4A (Anytime, Anywhere, Anything, Anybody) к образовательному контенту [11].

Термин конвергенция [12] в аспекте статьи означает процесс сближения ОП, образовательных стандартов, ЭОР, систем управления обучением и различных образовательных технологий, обусловленный необходимостью внедрения междисциплинарного обучения в процессе непрерывной подготовки специалистов. Процесс конвергенции связан с развитием информационно-коммуникационных технологий, так как с 1990-х годов существует тенденция к интеграции компьютерных, телекоммуникационных и мультимедийных технологий и взаимопроникновению информационных технологий, когда инновации появляются в междисциплинарной области знаний [13–17].

Конвергентный подход также определяется как NBIC-конвергенция (N – nano, B – bio, I – info, C – cognitive) нано-, био-, информационных и когнитивных технологий [18] на основе их системно-синергетической интеграции [19]. Термин введен в 2002 году учеными М. Роко и У. Бейнбриджем, которые определили особенности NBIC-конвергенции, проанализировали ее роль в развитии цивилизации [20]. В настоящее время в концепцию интегрируются социальные технологии, с помощью исследуются поведенческие, речевые, психологические и другие способности человека [21, 22]. Сближение социальных, когнитивных и информационных технологий позволяют говорить о новой конвергентной модели образовательного процесса. При этом когнитивные и социальные технологии представляют собой систему методов и алгоритмов, моделирующих и уси-

ливающих познавательные способности обучаемых при решении практических задач [23].

Конвергенция в образовании может быть реализована на разных уровнях в зависимости от сферы приложения, что позволяет определить:

- 1) образовательно-технологическую конвергенцию в плане сближения и сходимости образовательных технологий, моделей жизненных циклов (ЖЦ) ОП и ЭОР;
- 2) учебно-методическую конвергенцию в плане сближения и сходимости ОП разных специальностей и ЭОР по разным дисциплинам;
- 3) профессиональную конвергенцию в плане сближения компетенций для различных видов профессиональной деятельности и требований работодателей;
- 4) организационную конвергенцию в плане сближения систем управления образовательным контентом (Learning Content Management System – LCMS), систем управления обучением (Learning Management System – LMS) [24], систем управления учебной деятельностью (Learning Activity Management System – LAMS);
- 5) когнитивно-креативную конвергенцию в плане сближения творческих и когнитивных технологий при подготовке специалистов для профессиональной деятельности.

Результатом конвергенции является синтез и развитие ИИОС с интеграцией разных образовательных платформ, сервисов и технологий. ИИОС должна рассматривать процесс непрерывного обучения как целостный цикл, предусматривающий изучение, исследование, творчество, анализ, дискуссию, публикацию, проектную деятельность и т. п.

Конвергентная модель ИИОС определяет сближение (схождение) и интеграцию образовательных технологий на основе единой технологической платформы с унифицированной системой представления образовательного контента, системой оценки знаний, системой управления учебным процессом. Модель реализует процессы:

- 1) сближения моделей ЖЦ ОП, ЭОР и уровней квалификации специалистов;
- 2) сближения образовательных технологий (e-learning, m-learning, cloud learning, blended learning, ubiquitous learning) на базе единой ИОС;
- 3) интеграции кроссплатформенных LMS, LAMS, LCMS систем на базе облачной модели хранения образовательного контента, с организацией повсеместного доступа к нему с мобильных средств связи;
- 4) интеграции и адаптации механизмов управления и администрирования ИИОС с обеспечением информационной безопасности.

Известно, что различные ОП проходят свои жизненные циклы, в процессе которых происходит их сближение в плане получения одинаковых компетенций в области информационных и телекоммуникационных технологий. Практически все ЖЦ соответствуют итеративной модели развития. В процессе реализации ОП применяется множество ЭОР, которые также проходят собственные ЖЦ и имеют тенденцию к сходимости образовательного контента.

Таким образом, модель конвергентного образования определяет сближение компетенций, получаемых различными специалистами в рамках ЖЦ их собственных уровней квалификации и профессиональных знаний. ЖЦ специалиста включает профессиональную деятельность (исполнение трудовых обязанностей) и обучение (повышение квалификации) [25]. Для профессиональной деятельности специалист должен иметь базовый образовательный уровень, который он получает в ходе обучения по программам высшего образования или среднего профессионального образования. Однако, научно-технологический прогресс, смена должности, изменение трудовых функций требуют совершенствования имеющихся или приобретения новых компетенций, которые часто лежат за пределами квалификации специалиста. Получение новых компетенций требует освоения междисциплинарных знаний, что является сущностью конвергентной модели. Специалист должен постоянно заниматься самообразованием, чтобы его компетенции соответствовали изменяющимся требованиям работодателей. Однако самообразования часто недостаточно, чтобы получить новые компетенции. В этом случае специалисту требуется пройти обучение по дополнительным программам в рамках своей специализации, либо по новым программам при смене специальности. При этом ОП должны быть согласованы и синхронизированы с текущим уровнем подготовки специалиста и с изменяющимися требованиями работодателей. Требования к ОП для подготовки и переподготовки специалистов также базируются на требованиях образовательных стандартов. На ЖЦ ОП влияют: а) должностные обязанности, б) программы компетенции, в) пробелы в образовании специалистов, выявленные в ходе аттестации.

В рамках конвергентной модели разработана методика создания и синхронизации ОП по различным направлениям подготовки специалистов (рис. 1).



Рис. 1. Методика создания и синхронизации ОП

Первым шагом создания ОП является анализ требований работодателей. Следующим шагом создания ОП сбор информации о ЭОР, которые могут быть использованы в процессе обучения. Далее выполняется разработка ОП, ее структуры и содержания, которые учитываются при синтезе ЭОР. Кроме ОП необходимо создать инструменты оценки на соответствие требованиям стан-

дартов и работодателей для определения степени ее готовности ОП к осуществлению учебного процесса, либо необходимости доработки.

В процессе реализации ОП осуществляется выбор образовательных технологий и осуществляется планирование обучения, включающее составление графика и расписания занятий. Следующим шагом является проведение обучения с использованием ЭОР. Завершается реализация ОП оценкой полученных компетенций обучаемых. Методика позволяет создавать ОП, адаптированные к изменяющимся требованиям работодателей, законодательства и образовательных стандартов.

В ИИОС основными компонентами для освоения большинства ОП являются ЭОР. Поэтому требования стандартов и работодателей фактически являются требованиями к ЭОР и, следовательно, ЖЦ ОП тесно связаны с ЖЦ ЭОР.

ЖЦ ЭОР включает этапы создания, использования, модернизации и морального старения. Процесс создания начинается с анализа технических требований (форматов и технологий, информационных материалов, нормативных документов), требований ОП и условий ее реализации (технологии обучения, требования к содержанию ЭОР). На основе анализа выполняется проектирование ЭОР. Дальнейшими шагами являются реализация (с учетом уточненной структуры и содержания материалов ОП), интеграция компонент ЭОР, тестирование и верификаций ЭОР, проверка, публикация и сопровождение.

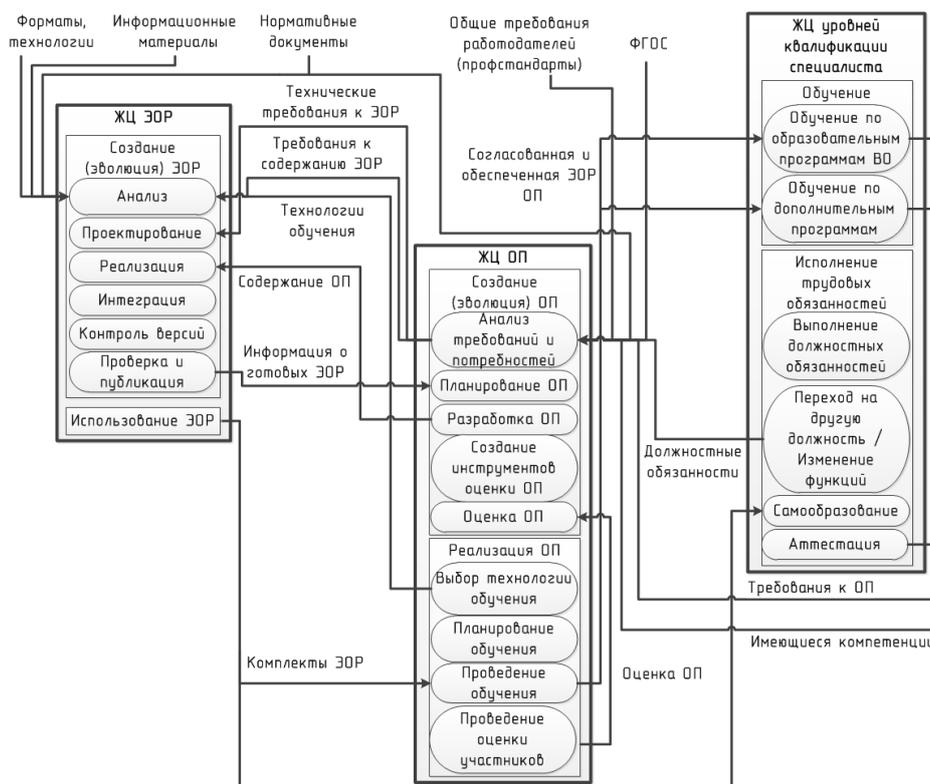


Рис. 2. Схема синхронизации жизненных циклов

Таким образом, базовым процессом непрерывного образования является синхронизация и согласование ОП, ЭОР с уровнями квалификации специалистов для реализации способов освоения новых компетенций из различных областей знаний в рамках конвергентной модели. Схема синхронизации ЖЦ

представлена на рис. 2.

Для формализации процесса синхронизации ОП, ЭОР и специалиста разработана графовая модель (рис. 3). Модель представляет ориентированный псевдограф  $M=[F, S, X]$ , где  $F$  – процесс синхронизации ЖЦ,  $S$  – матрица смежности,  $X$  – матрица инцидентности.

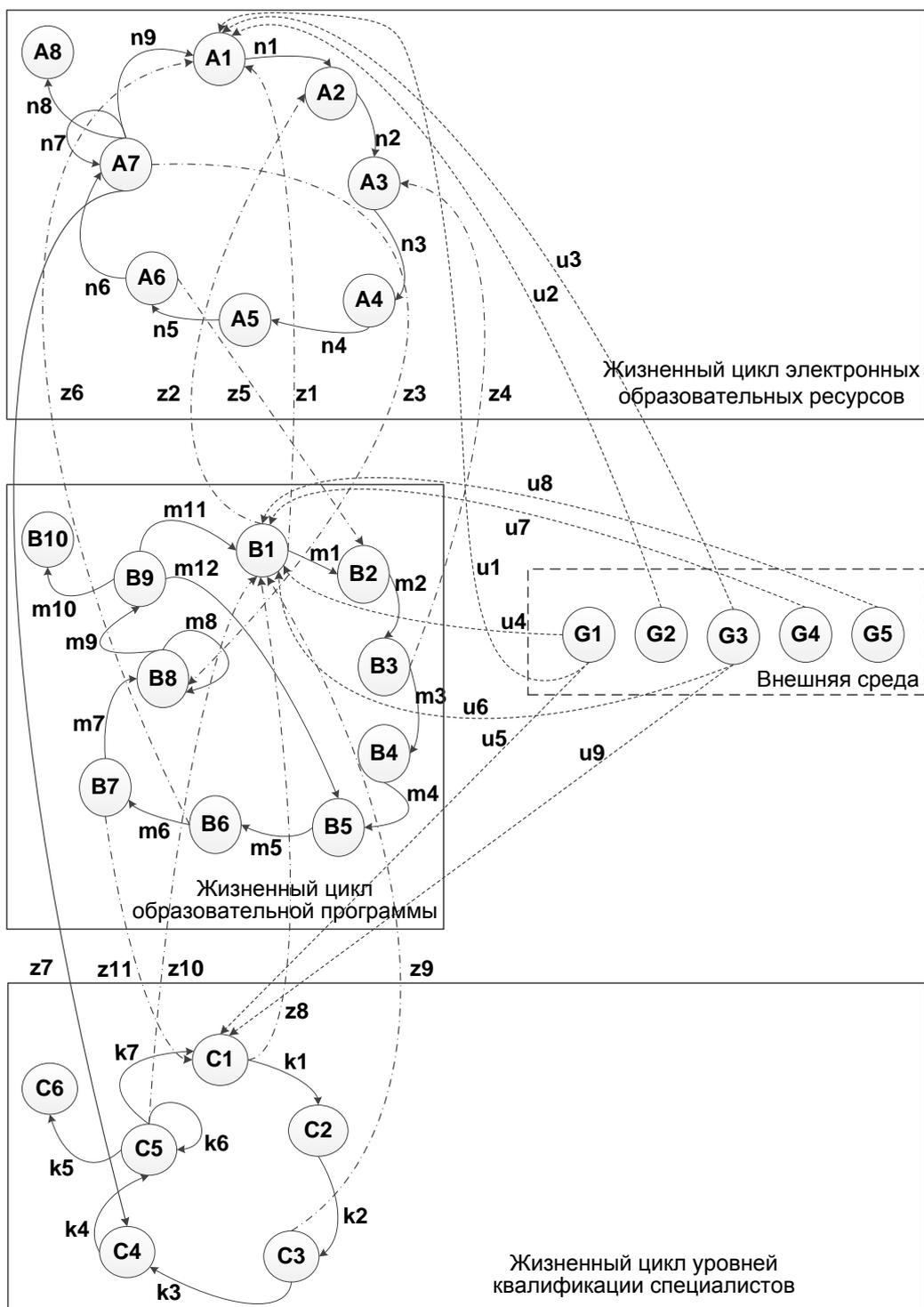


Рис. 3. Графовая модель синхронизации ЖЦ

В таблицах 1–4 представлены обозначения вершин подграфов модели синхронизации. Внутренние переходы ( $n, m, k$ ) между этапами ЖЦ представле-

ны сплошными линиями, штриховые линии – внешние воздействия (*u*), штрихпунктирные линии – переходы между подграфами (взаимодействия ЖЦ, *z*). Более подробно они описаны в таблице 5.

Таблица 1 – Обозначения вершин подграфа «Жизненный цикл ЭОР»

Обозначение	Пояснение
A1	Анализ требований
A2	Проектирование
A3	Реализация
A4	Интеграция
A5	Контроль версий
A6	Проверка и публикация
A7	Использование ЭОР
A8	Вывод из эксплуатации

Таблица 2 – Обозначения вершин подграфа «Жизненный цикл ОП»

Обозначение	Пояснение
B1	Анализ требований и потребностей
B2	Планирование ОП
B3	Разработка ОП
B4	Создание инструментов оценки ОП
B5	Оценка ОП
B6	Выбор технологии обучения
B7	Организация процесса обучения
B8	Проведение обучения
B9	Проведение оценки участников
B10	Вывод ОП из эксплуатации

Таблица 3 – Обозначения вершин подграфа «Жизненный цикл уровней квалификации специалиста»

Обозначение	Пояснение
C1	Обучение (прохождение обучения)
C2	Выполнение должностных обязанностей
C3	Переход на другую должность (смена функций)
C4	Самообразование
C5	Аттестация
C6	Окончание обучения

Таблица 4 – Обозначения вершин подграфа «Внешняя среда»

Обозначение	Пояснение
G1	Форматы, технологии
G2	Информационные материалы
G3	Нормативные документы
G4	Общие требования работодателей (профстандарты)
G5	ФГОС

Таблица 5 – Обозначения связей графовой модели синхронизации ЖЦ

Обозначение	Пояснение
<i>n1 ... n9</i>	Внутренние переходы между этапами ЖЦ ЭОР
<i>m1 ... m12</i>	Внутренние переходы между этапами ЖЦ ОП
<i>k1 ... k7</i>	Внутренние переходы между этапами ЖЦ уровней квалификации специалистов
<i>u1, u4, u5</i>	Внешнее воздействие «Форматы, технологии»
<i>u2</i>	Внешнее воздействие «Информационные материалы»
<i>u3, u6, u9</i>	Внешнее воздействие «Нормативные документы»
<i>u4</i>	Внешнее воздействие «Общие требования работодателей (профстандарты)»
<i>u5</i>	Внешнее воздействие «ФГОС»
<i>z1</i>	Требования к контенту ЭОР
<i>z2</i>	Технические требования к ЭОР
<i>z3, z7</i>	Сформированные комплекты ЭОР
<i>z4</i>	Содержание ОП
<i>z5</i>	Информация о готовых комплектах ЭОР
<i>z6</i>	Выбранные технологии обучения
<i>z8</i>	Имеющиеся компетенции обучаемых
<i>z9</i>	Должностные обязанности
<i>z10</i>	Требования к ОП на основе аттестации
<i>z11</i>	Согласованная ОП, обеспеченная ЭОР

Разработанная графовая модель используется при построении архитектуры информационной образовательной среды, на ней изображены внешние и внутренние взаимодействия ЖЦ, используемые при синхронизации систем управления компонентами. Также, на основе представленной модели разработаны интегральные показатели ЖЦ и комплексная оценка синхронизации ЖЦ.

Для реализации ЖЦ ОП, ЭОР и уровней квалификации специалистов разработана унифицированная платформа ИИОС на базе интеграции систем управления контентом (CMS Alfresco) и системы управления обучением (LMS Moodle). В рамках конвергентной модели ИИОС разработано облачное хранилище образовательного контента. ИИОС является платформой для согласования и синхронизации моделей ОП, ЭОР и уровней квалификации специалистов на основе объединения системы управления ЖЦ ЭОР LCMS Alfresco, системы непрерывной подготовки LMS Moodle, системы управления обучением LAMS и подсистемы поиска и интеллектуальной обработки требований работодателей. На рис. 4 представлена детализированная информационная модель ИОС.

Компоненты предложенной ИОС были внедрены в электронную информационную образовательную среду Пензенского государственного университета. Внедрение результатов научного исследования показало снижение общей трудоёмкости процесса создания и загрузки ОП за счет: сокращения в 2 раза времени создания ОП, уменьшения времени модернизации ОП в 1,5 раза, снижения времени создания внутренней структуры ОП в 3 раза. Количественные показатели внедрения: в ЭИОС ПГУ было сформировано более 500 ОП, содержащих около 30000 учебных дисциплин по разным направлениям и уровням подготовки.

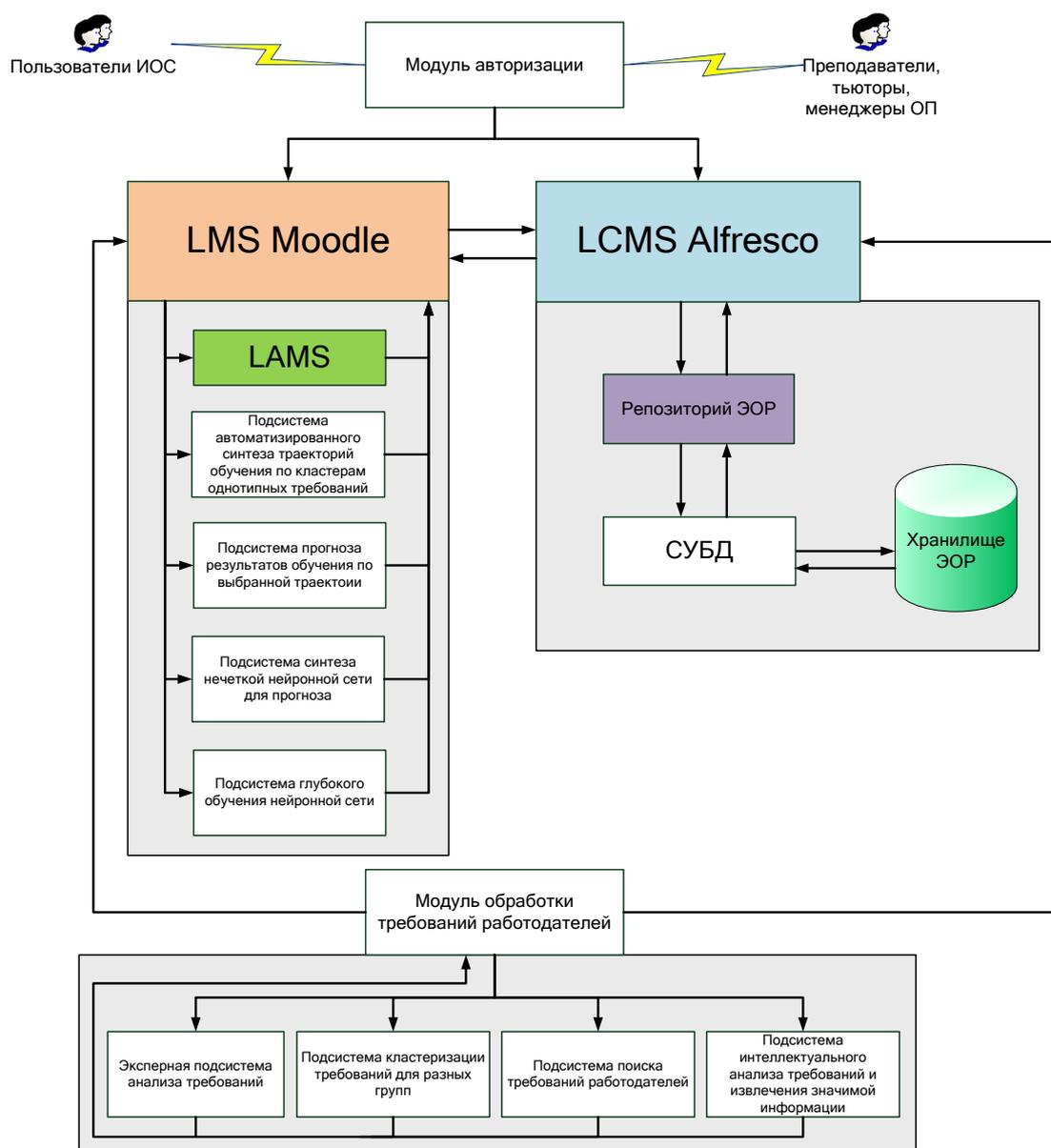


Рис. 4. Информационная модель ИОС

### Заключение

В результате выполнения научной работы была разработана модель ИИОС с системой управления ЖЦ ее компонент в процессе непрерывной подготовки специалистов на основе конвергентного подхода, графовая модель и схема синхронизации ЖЦ ЭОР, ОП и уровней квалификации специалистов, методика создания, синхронизации и согласования ОП по различным направлениям подготовки.

Предложенные модели использовались при реализации ИИОС непрерывной подготовки в Пензенском государственном университете на основе интеграции системы управления ЖЦ ЭОР LCMS Alfresco, системы непрерывной подготовки LSM Moodle, системы управления обучением LAMS и подсистемы поиска и интеллектуальной обработки требований работодателей.

Разработанная платформа в настоящее время используется в Пензенском государственном университете для переподготовки специалистов, синтеза и

управления готовыми комплектами ЭОР и ОП. Внедрение разработанной программной среды позволило значительно сократить время ее наполнения электронным образовательным контентом, повысить качество образовательного контента и качество подготовки специалистов. В ходе дальнейших исследований разрабатываются интеллектуальные механизмы для оценки синхронизации и взаимодействия жизненных циклов ЭОР, ОП и уровней квалификации специалистов.

### Благодарности

Результаты работы получены при финансовой поддержке РФФИ в рамках грантов № 16-07-00031, 17-307-50010.

### Литература

1. Deev M. V., Glotova T. V., Krevskiy I. G. Individualized Learning Trajectories Using Distance Education Technologies // Creativity in Intelligent, Technologies and Data Science. Series «Communications in Computer and Information Science». 2015. Vol. 535. P. 778-792.
2. Deev M. V., Glotova T. V., Krevskiy I. G. Models of Supporting Continuing Education of Specialists for High-Tech Sector // Knowledge-Based Software Engineering. 2014. Vol. 466. P. 100-112.
3. Программная платформа для корпоративного знания = LMS +/- LCMS? // Инструменты электронного обучения [Электронный ресурс]. 08.12.2017. – URL: <http://elearntools.blogspot.ru/2012/04/lms-lms.html> (дата обращения 08.12.2017).
4. ГОСТ Р 52653-2006 Информационно-коммуникационные технологии в образовании. Термины и определения. - М.: Стандартинформ, 2007. - 7 с.
5. ГОСТ Р 52656-2006 Информационно-коммуникационные технологии в образовании. Образовательные интернет-порталы федерального уровня. Общие требования. - М.: Стандартинформ, 2007. - 7 с.
6. Ильин В. А. Электронные образовательные ресурсы. Виды, структуры, технологии // Программные продукты и системы и алгоритмы. 2014. № 1. С. 1-7.
7. Кравченко А. И. Непрерывное образование: гибкость и рост // Элитариум. Центр дополнительного образования [Электронный ресурс]. 08.12.2017. – URL: [http://www.elitarium.ru/2010/09/29/nepreryvnoe\\_obrazovanie.html](http://www.elitarium.ru/2010/09/29/nepreryvnoe_obrazovanie.html) (дата обращения 08.12.2017).
8. Кривопалова И. В. Современные технологии информатизации образования // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2010. № 6. С. 1963-1965.
9. Григорьева С. С., Ефимова Е. А. Проблема оценки качества электронных методических комплексов // Прикаспийский журнал: Управление и высокие технологии. 2008. № 3. С. 39-43.

10. Сапаров К. М. К вопросу о качестве образования и методах его оценки // Прикаспийский журнал: Управление и высокие технологии. 2008. № 2. С. 77-82.

11. William H. Designing Web-Based Training: How to Teach Anyone Anything Anywhere Anytime. – John Wiley & Sons, 2000. – 640 p.

12. Конвергенция // Википедия: свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. 08.12.2017. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Конвергенция/> (дата обращения 08.12.2017).

13. Родзин С. И., Титаренко И. Н. NBIC-технологии, искусственный интеллект и электронная культура // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. 2013. № 2 (13). С. 1-14.

14. Ковальчук М. В. Конвергенция наук и технологий - прорыв в будущее // Российские нанотехнологии. 2011. Т. 6. № 1-2. С. 13-23.

15. Финогеев А. Г., Камаев В. А., Финогеев А. А. Конвергентная модель сбора и распределенной обработки данных в системах энергетического мониторинга SCADA систем // Прикаспийский журнал: Управление и высокие технологии. 2015. № 3 (31). С. 58-75.

16. Finogeev A. G., Parygin D. S., Finogeev A. A. A convergent model for distributed processing of Big Sensor Data in urban engineering networks // Journal of Physics: Proceedings of the International Conference on Information Technologies in Business and Industry. 2017. Vol. 803. P. 1-6.

17. Finogeev A. G., Parygin D. S., Finogeev A. A. The convergence computing model for big sensor data mining and knowledge discovery // Human-centric Computing and Information Sciences. 2017. Vol. 7. P. 7-11.

18. Bainbridge M. S., Roco M. C. Managing Nano-Bio-Info-Cogno Innovations: Converging Technologies in Society. – N.Y.: Springer, 2005. – 390 p.

19. Финогеев А. Г. Моделирование исследование системно-синергетических процессов в информационных средах: Монография. - Пенза: Изд-во ПГУ, 2004. – 223 с.

20. Roco M., Bainbridge W. Converging Technologies for Improving Human Performance: Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science. – Springer, Dordrecht, 2004. – 468 p.

21. Курчатровский проект конвергентного образования // Хабрахабр [Электронный ресурс]. 08.12.2017. – URL: <http://habrahabr.ru/company/softline/blog/256703/> (дата обращения 08.12.2017).

22. Черникова Д. В., Черникова И. В. Расширение человеческих возможностей: когнитивные технологии и их риски // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 321. № 6. С. 114-119.

23. Кудашов В. И. Социальные технологии в обществе знания: когнитивные аспекты // Вестник Томского государственного университета. 2012. № 4 (20). С. 58-64.

24. Finogeev A. G., Fionova L. R., Finogeev A. A., Thai Quang Vinh Learning Management System for the Development of Professional Competencies // Creativity in Intelligent Technologies and Data Science. Series «Communications in Computer and Information Science». 2015. Vol. 535. P. 793-803.

25. Finogeev A. G., Fionova L. R. Elaboration of automated systems for development of professional competence // *Research Journal of Applied Sciences*. 2015. Vol. 10. P. 7-11.

### References

1. Deev M. V., Glotova T. V., Krevskiy I. G. Individualized Learning Trajectories Using Distance Education Technologies. *Creativity in Intelligent, Technologies and Data Science. Series «Communications in Computer and Information Science»*, 2015, vol. 535, pp. 778-792.

2. Deev M. V., Glotova T. V., Krevskiy I. G. Models of Supporting Continuing Education of Specialists for High-Tech Sector. *Knowledge-Based Software Engineering*, 2014, vol. 466, pp. 100-112.

3. Programmaja platforma dlja korporativnogo znanija = LMS +/- LSMS? [Software platform for corporate knowledge = LMS +/- LMS?]. *E-learning tools*, 08 December 2017. Available at: <http://elearntools.blogspot.ru/2012/04/lms-lms.html> (accessed 08 December 2017) (in Russian).

4. State Standard R 52653-2006. Information and communication technologies in education. Terms and definitions. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 7 p. (in Russian).

5. State Standard R 52656-2006. Information and communication technologies in education. Federal level educational internet-portals. General requirements. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 7 p. (in Russian).

6. Il'in V. A. Electronic educational resources. Types, structures, technologies. *Programmnye produkty i sistemy i algoritmy*, 2014, vol. 1, pp. 1-7 (in Russian).

7. Kravchenko A. I. Nepreryvnoe obrazovanie: gibkost' i rost [Kravchenko A. I. Continuing Education: Flexibility and Growth]. *Elitarium. Center for Continuing Education*, 08 December 2017. Available at: [http://www.elitarium.ru/2010/09/29/nepreryvnoe\\_obrazovanie.html](http://www.elitarium.ru/2010/09/29/nepreryvnoe_obrazovanie.html) (accessed 08 December 2017) (in Russian).

8. Krivopalova I. V. Modern technologies of informatization of education. *Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, 2010, vol. 6, pp. 1963-1965 (in Russian).

9. Grigor'eva S. S., Efimova E. A. The problem of assessing the quality of electronic methodical complexes. *Caspian Journal: Management and High Technologies*, 2008, vol. 3, pp. 39-43 (in Russian).

10. Saparov K. M. On the quality of education and methods for its evaluation. *Caspian Journal: Management and High Technologies*, 2008, vol. 2, pp. 77-82 (in Russian).

11. William H. *Designing Web-Based Training: How to Teach Anyone Anything Anywhere Anytime*. John Wiley & Sons, 2000. 640 p.

12. Konvergencija [Convergence]. *Wikipedia Russia*, 08 December 2017. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Konvergencija/> (accessed 08 December 2017) (in Russian).

13. Rodzin S. I., Titarenko I. N. NBIK-technologies, artificial intelligence and electronic culture. *Informatika, vychislitel'naja tehnika i inzhenernoe obrazovanie*, 2013, vol. 2, no. 13, pp. 1-14 (in Russian).

14. Koval'chuk M. V. The convergence of science and technology is a breakthrough in the future. *Nanotechnologies in Russia*, 2011, vol. 1-2, pp. 13-23 (in Russian).

15. Finogeev A. G., Kamaev V. A., Finogeev A. A. Convergent model of collection and distributed data processing in energy monitoring systems of SCADA systems. *Caspian Journal: Management and High Technologies*, 2015, vol. 3, no. 31, pp. 58-75 (in Russian).

16. Finogeev A. G., Parygin D. S., Finogeev A. A. A convergent model for distributed processing of Big Sensor Data in urban engineering networks. *Journal of Physics: Proceedings of the International Conference on Information Technologies in Business and Industry*, 2017, vol. 803, pp. 1-6.

17. Finogeev A. G., Parygin D. S., Finogeev A. A. The convergence computing model for big sensor data mining and knowledge discovery. *Human-centric Computing and Information Sciences*, 2017, vol. 7, pp. 7-11.

18. Bainbridge M. S., Roco M. C. *Managing Nano-Bio-Info-Cogno Innovations: Converging Technologies in Society*. N.Y.: Springer, 2005. 390 p.

19. Finogeev A. G. Modelirovanie issledovanie sistemno-sinergeticheskikh processov v informacionnyh sredah. Monografija [Modeling research of system-synergetic processes in information environments. Monography]. Penza, Penza State University Publ., 2004. 223 p. (in Russian).

20. Roco M., Bainbridge W. *Converging Technologies for Improving Human Performance: Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science*. Springer, Dordrecht, 2004. 468 p.

21. Kurchatovskij proekt konvergentnogo obrazovanija [Kurchatov's project of convergent education]. *Habrahabr*, 08 December 2017. Available at: <http://habrahabr.ru/company/softline/blog/256703/> (accessed 08 December 2017) (in Russian).

22. Chernikova D. V., Chernikova I. V. Expanding Human Capabilities: Cognitive Technologies and Their Risks. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 6, pp. 114-119 (in Russian).

23. Kudashov V. I. Social technologies in the knowledge society: cognitive aspects. *Tomsk State University Journal*, 2012, vol. 4, no. 20, pp. 58-64 (in Russian).

24. Finogeev A. G., Fionova L. R., Finogeev A. A., Thai Quang Vinh Learning Management System for the Development of Professional Competencies. *Creativity in Intelligent Technologies and Data Science. Series «Communications in Computer and Information Science»*, 2015, vol. 535, pp. 793-803.

25. Finogeev A. G., Fionova L. R. Elaboration of automated systems for development of professional competence. *Research Journal of Applied Sciences*, 2015, vol. 10, pp. 7-11.

Статья поступила 22 декабря 2017 г.

### Информация об авторах

*Деев Михаил Викторович* – аспирант кафедры «Системы автоматизированного проектирования». Пензенский государственный университет. Область научных интересов: информационные технологии в образовании, электронные и дистанционные образовательные технологии. E-mail: miqz@yandex.ru

*Кравец Алла Григорьевна* – доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры «Системы автоматизированного проектирования и поискового конструирования». Волгоградский государственный технический университет. Область научных интересов: автоматизированное управление в сложных системах, технологии и программное обеспечение распределенных и высокопроизводительных вычислительных систем, извлечение знаний, базы данных и базы знаний. E-mail: agk@gde.ru

*Финогеев Алексей Германович* – доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры «Системы автоматизированного проектирования». Пензенский государственный университет. Область научных интересов: информационные технологии, беспроводные сети и технологии, беспроводные сенсорные сети, SCADA системы, информационная безопасность. E-mail: alexeyfinogeev@gmail.com

Адрес: 440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, д. 40.

---

## Development of an information educational environment based on a convergent approach

M. V. Deev, A. G. Kravets, A. G. Finogeev

**Purpose.** In the article, the problems of designing a Smart Learning Environment (SLE) are considered. SLE is necessary for managing the processes of convergent education and professional development of specialists. The goal is to ensure the interaction of the components life cycles, such as electronic educational resources, educational programs and skill levels. **Methods.** The processes of convergence in education determine the competencies unity that are necessary for trainees of different specialties and skill levels. A convergent model is also proposed for the interaction of the main SLE components. **Novelty.** It involves deep integration of educational and information technologies on a single network platform. The platform includes an educational content management system, an educational management system, a training management system, a knowledge assessment system, an intellectual system for analyzing employers' requirements, a labor market forecasting system, a Web interface, etc. **Practical relevance.** SLE represents the mechanism of integration and synchronization of educational resources and training systems. It supports the convergence of electronic, mobile, cloud, mixed and ubiquitous learning technologies.

**Key words:** convergence, qualification, specialist, intellectual educational environment, educational program, life cycle, electronic educational resource, convergent education.

### Information about Authors

*Mikhail Viktorovich Deev* – Postgraduate. Postgraduate student of the Department of Computer aided design systems. Penza State University. Field of research: information technologies in education, electronic and distance educational technologies. E–mail: [miqz@yandex.ru](mailto:miqz@yandex.ru)

*Alla Grigor'evna Kravets* – D.Sc. of Engineering Sciences, Full Professor. Full Professor of the Department of Computer aided design and Search design systems. Volgograd State Technical University. Field of research: automated control in complex systems, technologies and software of distributed and high-performance computing systems, knowledge extraction, databases and knowledge bases. E–mail: [agk@gde.ru](mailto:agk@gde.ru)

*Aleksej Germanovich Finogeev* – D.Sc. of Engineering Sciences, Full Professor. Full Professor of the Department of Computer aided design systems. Penza State University. Field of research: information technologies, wireless networks and technologies, wireless sensor networks, SCADA systems, information security. E–mail: [alexeyfinogeev@gmail.com](mailto:alexeyfinogeev@gmail.com)

Address: Russia, 440026, Penza, Krasnaja St., 40.

УДК 681.32

## Динамические автоматы и их приложение для анализа сложных пространственных сцен

Левин В. И.

**Актуальность.** В архитектурном проектировании, при построении робототехнических систем, в военном деле и ряде других областей большое значение имеет задача анализа взаимоотношения объектов пространственных сцен (изображений). При этом важное значение имеет выбор подходящей модели для такого анализа, которая позволяет быстро выполнять необходимые вычисления. **Цель статьи** заключается в разработке автоматически-логической модели анализа пространственных сцен и соответствующих логических методов выполнения необходимых вычислений, которые отличаются от известных моделей и методов использованием конструктивных автоматной модели и логических методов вычислений. **Метод.** Для достижения поставленной цели предложено заменить традиционные численные методы анализа пространственных сцен новым методом, в котором моделью анализа является динамический конечный автомат, входные процессы которого моделируют отдельные объекты сцены, а выходные процессы – взаимоотношения этих объектов. **Новизна** работы состоит в построении адекватной автоматной модели анализа пространственных сцен, позволяющей свести этот анализ к вычислению выходных процессов автомата-модели по его входным процессам. **Результат.** В статье детально разработаны автоматически-логическая модель анализа пространственных сцен и методы ее исследования, которые позволяют вводить новые показатели взаимоотношения объектов сцен и вычислять их значения логическими методами.

**Ключевые слова:** непрерывная логика, динамический автомат, пространственная сцена, изображение, анализ сцены.

### Введение

В работе [1] изложен математический аппарат непрерывной логики и описаны простые случаи его применения, связанные с информатикой: геометрическое моделирование, принятие приближенных решений, оптимизация и др. Имеется также много других задач из области информатики, которые эффективно решаются с помощью аппарата непрерывной логики (НЛ) или его обобщений [1]. Например, когда объект исследования сложный (высокоразмерный), весьма эффективным оказывается применение обобщающего НЛ аппарата логических определителей. Необходимо отметить, что при исследовании сложных объектов «наивное» моделирование [1] в терминах НЛ не применимо и нужно искать специальные, более мощные модели для получения адекватного непрерывно-логического описания объекта. Одной из наилучших моделей такого рода является конечный динамический автомат [2–4].

В настоящей статье речь идет о проблеме анализа изображений (пространственных сцен), которая может быть эффективно решена именно благода-

---

#### Библиографическая ссылка на статью:

Левин В. И. Динамические автоматы и их приложение для анализа сложных пространственных сцен // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 3. С. 135-143. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-03/07-Levin.pdf>

#### Reference for citation:

Levin V. I. Dynamic Automata and Analysis of Complex Spatial Scenes. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 3, pp. 135-143. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-03/07-Levin.pdf> (in Russian).

ря использованию автоматной модели. Суть этой проблемы состоит в том, чтобы по имеющемуся изображению в виде совокупности визуальных объектов в пространстве данной размерности формальным путем выяснить характеристики взаиморасположения объектов, по которым можно было бы анализировать указанное изображение для более полного его понимания.

Ранее автор уже рассматривал вопросы анализа изображений на основе автоматных моделей в работе [5]. Настоящая работа продолжает цикл исследований автора в данном направлении. От ранее опубликованной работы автора [5] она отличается усовершенствованием математической модели и расчетных формул.

### Моделирование пространственных сцен на основе динамических автоматов

Рассмотрим произвольное  $N$ -мерное евклидово пространство  $E^N$ , заполненное  $N$ -мерными объектами, с общим числом объектов  $n$ . Объекты считаются пересекающимися, т. е. заполнение любым объектом любой области  $E_i^N \in E^N$  не мешает нахождению в  $E_i^N$  другого объекта. Положение каждого объекта в пространстве  $E^N$  полностью определено. Очевидно, что изображение  $P$ , получающееся в результате взаимодействия всех имеющихся объектов пространства  $E^N$ , можно представить в виде объединения изображений

$$P = P_0 \cup P_1 \cup \dots \cup P_n, \quad (1)$$

где  $P_k (k = \overline{0, n})$  – изображение пересечений  $k$  различных объектов, включающее изображения  $P(i_1, i_2, \dots, i_k)$  всех возможных конкретных комбинаций  $(i_1, i_2, \dots, i_k)$   $k$  пересекающихся объектов, т. е.

$$P_k = \bigcup_{i_1 < i_2 < \dots < i_k} P_k(i_1, i_2, \dots, i_k), k = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где  $P_0$  – изображение в некоторой области  $E_0^N$  пространства  $E^N$ , не содержащее ни одного объекта;  $P_1$  – изображение в другой области  $E_1^N$  пространства  $E^N$ , в которой имеются только одиночные, не пересекающиеся с другими объекты;  $P_2$  – изображение в третьей области  $E_2^N$  пространства  $E^N$ , в которой имеются только попарно пересекающиеся объекты, и  $P_n$  – изображение в области  $E_n^N$  пространства  $E^N$ , содержащей только пересечение всех  $n$  объектов.

Ясно, что

$$E^N = E_0^N \cup E_1^N \cup \dots \cup E_n^N; E_i^N \cap E_j^N = \emptyset, i \neq j. \quad (3)$$

В свою очередь,

$$E_k^N = \bigcup_{i_1 < i_2 < \dots < i_k} E_k^N(i_1, i_2, \dots, i_k), E_k^N(I) \cap E_k^N(J) = \emptyset, I \neq J, \quad (4)$$

где  $E_k^N(J)$  – область пространства  $E^N$ , в которой имеется пересечение только конкретного набора  $k$  объектов  $J = (i_1, \dots, i_k)$ .

Задача 1 состоит в том, чтобы найти области  $E_k^N$ , соответствующие изображениям  $P_k$  в виде пересечений любого фиксированного числа  $k$  неконкретизированных объектов ( $k = \overline{0, n}$ ). Задача 2 состоит в том, чтобы найти области  $E_k^N(J)$ , соответствующие изображениям  $P_k(J)$  в виде пересечений  $J = (i_1, \dots, i_k)$  любого числа  $k$  конкретных объектов  $i_1, \dots, i_k$  ( $k = \overline{1, n}$ ). Задача 2 является более детализированной, из ее решения всегда можно получить решение задачи 1, используя формулу (4). Задачи 1, 2 назовем *задачами анализа изображения  $P$* .

Сформулированные задачи для пространств  $E^N$  различной размерности  $N$  можно интерпретировать следующим образом.

1. Пространство  $E^1$ , т.е. прямая. Для него объектами являются заданные на прямой интервалы, причем допустимо пересечение интервалов по 2, по 3 и т.д. вплоть до  $n$  ( $n$  – общее число интервалов). Требуется найти участки прямой  $E_k^1$ , где пересекается ровно  $k$  любых интервалов,  $k = \overline{0, n}$  (задача 1), либо найти участки прямой  $E_k^1(i_1, \dots, i_k)$ , на которых пересекается ровно  $k$  конкретных интервалов  $i_1, \dots, i_k$ ,  $k = \overline{1, n}$  (задача 2).

2. Пространство  $E^2$ , т.е. плоскость. Для этого пространства объектами являются заданные на плоскости прямоугольники, стороны которых параллельны осям координат, при этом допустимо пересечение прямоугольников по 2, по 3, ..., по  $n$  ( $n$  – общее число прямоугольников). Выбор в качестве взаимодействующих объектов на плоскости именно прямоугольников, очевидно, не ограничивает общности рассмотрения, так как любую плоскую фигуру можно представить с любой степенью точности с помощью вписанных в нее «плотно упакованных» прямоугольников. Требуется найти области на плоскости  $E_k^2$ , в которых пересекаются ровно  $k$  любых прямоугольников,  $k = \overline{0, n}$  (задача 1), либо найти области на плоскости  $E_k^2(i_1, \dots, i_k)$ , в которых пересекаются  $k$  конкретных прямоугольников  $i_1, \dots, i_k$ ,  $k = \overline{1, n}$  (задача 2).

3. Пространство  $E^3$ , т.е. трехмерное пространство. Здесь объектами являются заданные в нем прямые параллелепипеды со сторонами, параллельными осям координат. Допустимо пересечение этих параллелепипедов по 2, по 3, ..., по  $n$  ( $n$  – общее число параллелепипедов). Выбор в качестве объектов в трехмерном пространстве прямых параллелепипедов не ограничивает общности, поскольку любой трехмерный объект можно представить с любой степенью точности посредством вписанных в него «плотно упакованных» прямых параллелепипедов. Требуется в пространстве  $E^3$  найти области  $E_k^3$ , в которых пересекается ровно  $k$  параллелепипедов, безразлично каких,  $k = \overline{0, n}$  (задача 1), либо найти области  $E_k^3(i_1, \dots, i_k)$  в  $E^3$ , где пересекается  $k$  конкретных параллелепипедов  $i_1, \dots, i_k$ ,  $k = \overline{1, n}$  (задача 2).

Будем рассматривать общий случай задач 1, 2 анализа изображения  $P$  в пространстве  $E^N$  произвольной размерности  $N$ . Согласно (1), произвольное

изображение  $P$  складывается из изображений пересечения  $P_k$  ( $k = \overline{0, n}$ ) ровно  $k$  любых различных объектов, и области  $E_k^N$  существования пересечений  $P_k$  для различных  $k$ , согласно (3) не пересекаются. В соответствии с этим введем систему двоичных функций  $f_k(x)$ ,  $k = \overline{0, n}$ , в пространстве  $E^N$ :

$$f_k(x) = \begin{cases} 1, x \in E_k^N; \\ 0, x \notin E_k^N. \end{cases} \quad (5)$$

Как видно из (5), произвольная  $k$ -я функция  $f_k(x)$  принимает значение 1 в области  $E_k^N$ , где существует пересечение  $P_k$ , и значение 0 в других областях, где это пересечение отсутствует. Поэтому функцию  $f_k(x)$  естественно назвать  $k$ -й обыкновенной спектральной функцией изображения  $P(1)$ , а совокупность всех таких функций  $f(x) = \{f_0(x), \dots, f_n(x)\}$  – обыкновенным спектром указанного изображения. Аналогично, согласно (2), произвольное пересечение  $P_k$  складывается из пересечений  $P_k(i_1, \dots, i_k)$  ровно  $k$  различных, конкретно определенных объектов  $i_1, \dots, i_k$ , причем области  $E_k^N(i_1, \dots, i_k)$  пересечений  $P_k(i_1, \dots, i_k)$  для различных комбинаций объектов  $(i_1, \dots, i_k)$ , согласно формуле (4), не пересекаются. В соответствии с этим введем систему двоичных функций  $G(x|i_1, \dots, i_k)$ ,  $k = \overline{1, n}$ ,  $i_1 < \dots < i_k \leq n$ , в пространстве  $E^N$ , определяемых в виде

$$G(x|i_1, \dots, i_k) = \begin{cases} 1, x \in E_k^N(i_1, \dots, i_k); \\ 0, x \notin E_k^N(i_1, \dots, i_k). \end{cases} \quad (6)$$

Из (6) видим, что произвольная  $k$ -я функция  $G(x|i_1, \dots, i_k)$  равна 1 в области  $E_k^N(i_1, \dots, i_k)$ , где существует пересечение  $P_k(i_1, \dots, i_k)$ , и равна 0 в областях, где это пересечение отсутствует. В соответствии с этим данную функцию назовем  $k$ -й маркированной спектральной функцией изображения  $P$ . Совокупность всех таких функций для всевозможных комбинаций объектов по 1, по 2, ... по  $n$  назовем маркированным спектром изображения  $P$  и обозначим  $G(x)$ . Таким образом, в отличие от обыкновенного спектра, отдельные спектральные функции которого выделяют лишь области пространства с изображением пересечения того или иного числа объектов (безотносительно к составу пересекающихся объектов), в маркированном спектре отдельные спектральные функции выделяют области пространства, где изображено пересечение конкретных комбинаций объектов. Однако и те, и другие обладают свойством индикации областей со всеми возможными типовыми фрагментами заданного изображения. Это подсказывает идею решения задач 1 и 2 анализа изображения, рассматриваемую ниже.

Так как все объекты в пространстве  $E^N$  есть  $N$ -мерные прямые параллелепипеды в  $E^N$  со сторонами, параллельными  $N$  осям координат, то пересечение любого числа  $k$  объектов ( $k = \overline{1, n}$ ) тоже является  $N$ -мерным прямым параллелепипедом в  $E^N$  со сторонами, параллельными  $N$  осям координат. Поэтому любое либо неконкретизированное  $P_k$ , либо конкретизированное  $P_k(i_1, \dots, i_k)$  по

составу, пересечение  $k$  объектов можно спроектировать на все оси координат  $x_1, \dots, x_N$ :

$$P_k \Rightarrow [P_k(x_1), P_k(x_2), \dots, P_k(x_N)], k = \overline{1, n}; \quad (7)$$

$$P_k(i_1, \dots, i_k) \Rightarrow [P_k(x_1 | i_1, \dots, i_k), P_k(x_2 | i_1, \dots, i_k), \dots, P_k(x_N | i_1, \dots, i_k)], k = \overline{1, n}, \quad (8)$$

где  $P_k(x_i)$  – проекция пересечения объектов  $P_k$  на ось  $x_i$ , а  $P_k(x_i | i_1, \dots, i_k)$  – проекция пересечения объектов  $P_k(i_1, \dots, i_k)$  на ту же ось. Различие между этими проекциями то же, что и в исходных пересечениях: в проекции  $P_k(x_i)$  указывается только число  $k$  объектов в исходном пересечении, а в  $P_k(x_i | i_1, \dots, i_k)$  дается еще конкретный перечень  $(i_1, \dots, i_k)$  объектов в пересечении. Любое пересечение  $P_k$ , согласно (2), состоит в общем случае из  $C_n^k$  разнесенных в пространстве пересечений  $P_k(i_1, \dots, i_k)$  конкретных объектов  $(i_1, \dots, i_k)$ ,  $(k = \overline{1, n})$ . Именно поэтому проекция пересечения  $P_k$  на любую ось также состоит в общем случае из  $C_n^k$  разнесенных вдоль этой оси проекций на нее пересечений  $P_k(i_1, \dots, i_k)$  (которые тоже делимы):

$$P_k(x_r) = \bigcup_{i_1 < i_2 < \dots < i_k} P_k(x_r | i_1, \dots, i_k), k = \overline{1, n}, r = \overline{1, N}.$$

В этом второе различие между проекциями (7) и (8). Сходство между ними в следующем: есть однозначное соответствие любого пересечения объектов  $P_k(i_1, \dots, i_k)$  и его проекций и однозначное соответствие любого пересечения объектов  $P_k$  и проекций при отсутствии однозначного обратного соответствия. Однако в случае  $N=1$  (т.е. в одномерном пространстве) имеется взаимнооднозначное соответствие между пересечениями объектов и их проекциями на единственную в этом случае ось.

Введенные проекции пересечений  $N$ -мерных объектов, как обыкновенные проекции  $P_k(x_r)$ , так и маркированные проекции  $P_k(x_r | i_1, \dots, i_k)$  – являются уже одномерными объектами, с которыми значительно проще работать. Для них общие  $N$ -мерные спектральные функции – обыкновенные (5) и маркированные (6) – переходят в соответствующие спектральные функции от одной переменной:

$$f_k(x_r) = \begin{cases} 1, & x_r \in E_{rk}^1, k = \overline{0, n}, r = \overline{1, N}; \\ 0, & x_r \notin E_{rk}^1, \end{cases} \quad (9)$$

$$G_k(x_r | i_1, \dots, i_k) = \begin{cases} 1, & x_r \in E_{rk}^1(i_1, \dots, i_k), k = \overline{1, n}, r = \overline{1, N}. \\ 0, & x_r \notin E_{rk}^1(i_1, \dots, i_k), \end{cases} \quad (10)$$

Согласно (9),  $k$ -я функция  $f_k(x_r)$  принимает значение 1 в той части  $E_{rk}^1$  оси  $x_r$ , где существует проекция  $P_k(x_r)$  пересечения  $P_k$ , и значение 0 в тех частях, где эта проекция отсутствует. Поэтому функцию  $f_k(x_r)$  можно назвать  $k$ -й обыкновенной 1-мерной спектральной функцией проекции  $P_k(x_r)$  пересечения  $P_k$  на ось  $x_r$ . Аналогично, по (10),  $k$ -я функция  $G_k(x_r | i_1, \dots, i_k)$  равна 1 в той части  $E_{rk}^1(i_1, \dots, i_k)$  оси  $x_r$ , где есть проекция  $P_k(x_r | i_1, \dots, i_k)$  пересечения  $P_k(i_1, \dots, i_k)$ , и рав-

на 0 в других частях, где эта проекция отсутствует. Поэтому  $G_k(x_r | i_1, \dots, i_k)$  можно назвать  $k$ -й одномерной маркированной спектральной функцией проекций  $P_k(x_r | i_1, \dots, i_k)$  пересечения  $P_k(i_1, \dots, i_k)$  на ось  $x_r$ .

Совокупность всех функций  $f_k(x_r), k = \overline{0, n}$  будем называть обыкновенным одномерным спектром изображения  $P(1)$  вдоль оси  $x_r$  пространства  $(r = \overline{1, N})$ . Аналогично совокупность всех функций  $G_k(x_r | i_1, \dots, i_k), k = \overline{1, n}$  назовем маркированным одномерным спектром изображения  $P(1)$  вдоль оси  $x_r$   $N$ -мерного пространства  $(r = \overline{1, N})$ .

Введенные одномерные спектры обладают свойством индикации участков соответствующих осей  $N$ -мерного пространства, на которых имеется проекция рассматриваемого пересечения объектов в данном пространстве. Из этого хорошо видно, что задачи 1 и 2 анализа изображения в  $N$ -мерном пространстве целесообразно пытаться решить путем их сведения либо к анализу одномерных спектров проекций этого изображения на все  $N$  осей этого пространства, либо просто к вычислению одномерных спектров вдоль параллельных прямых, пересекающих изображение.

Реализацию идеи, высказанной в предыдущем пункте, начнем с задач анализа изображений в одномерном пространстве, т. е. на прямой. Задача 1 при этом состоит в следующем. На оси  $x$  задано изображение  $P$  в виде совокупности  $n$  одномерных объектов – замкнутых интервалов  $[a_i, b_i], i = \overline{1, n}$ . Данная ситуация изображена на рис. 1. Эти интервалы могут взаимодействовать между собой, образуя различные пересечения. В результате изображение  $P$  распадается, согласно (1) на изображения:  $P_0$  в области  $E_0^1$  на оси  $x$ , не содержащей ни одного интервала;  $P_1$  в области  $E_1^1$ , содержащей только любые одиночные, не пересекающиеся с иными интервалы;  $P_2$  в области  $E_2^1$ , содержащей только попарно пересекающиеся интервалы,  $P_n$  в области  $E_n^1$ , которая содержит только пересечение всех  $n$  интервалов. Задача заключается в нахождении областей  $E_k^1, k = \overline{0, n}$ , на оси  $x$ , содержащих изображения  $P_k, k = \overline{0, n}$ , в виде пересечения любого фиксированного числа  $k$  неконкретизированных (т. е. любых) интервалов.

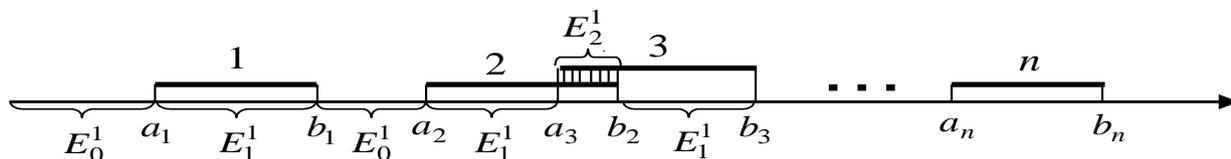


Рис. 1. Одномерное изображение

Будем интерпретировать точки оси  $x$  как моменты времени. Тогда задаче 1 с заданной системой пересекающихся интервалов можно поставить в соответствие математическую модель в виде конечного автомата без памяти (рис. 2)

с  $n$  двоичными входами  $x_1, \dots, x_n, x_i \in \{0,1\}$ , на которые подаются единичные импульсы  $1(a_i, b_i)$  (по одному на каждый вход), существующие во временных интервалах  $(a_i, b_i)$ , соответствующих заданным интервалам ( $i = \overline{1, n}$ ).

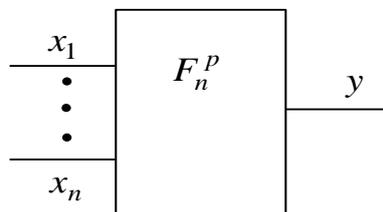


Рис. 2. Автоматная модель изображения

Этот динамический автомат имеет один двоичный выход  $y, y \in \{0,1\}$ , на котором реализуется фундаментальная симметрическая булева функция  $F_n^p$  индекса  $p$  ( $p = \overline{0, n}$ )  $n$  входных переменных  $x_1, \dots, x_n$ . Таким образом, выходная переменная автомата выражается через его входные переменные в виде

$$y^p = F_n^p(x_1, \dots, x_n); y, x_i \in \{0,1\}. \quad (11)$$

Как известно [4], фундаментальная симметрическая булева функция  $F_n^p = 1$  лишь тогда, когда  $p$  любых ее аргументов равны 1, и  $F_n^p = 0$  в остальных случаях. Таким образом, выходная переменная автомата-модели  $y = 1$  только тогда, когда  $p$  любых его входных переменных  $x_i$  равны 1. Это означает, что на выходе этого автомата единичные импульсы вырабатываются в тех временных интервалах, в которых на его входах пересекается (действует одновременно)  $p$  входных единичных импульсов. Таким образом, по определениям (5), (9), автомат-модель (рис. 2) с реализуемой булевой функцией  $F_n^p$  вырабатывает на выходе обыкновенную одномерную спектральную функцию  $f_p(x)$  переменной  $x$ , отмечающую своими единичными значениями области оси  $x$ , где пересекается  $p$  из  $n$  заданных интервалов  $[a_i, b_i], i = \overline{1, n}$ . Варьируя значение индекса  $p$  функции  $F_n^p$  автомата-модели от 0 до  $n$ , получим обыкновенный одномерный спектр  $f(x) = \{f_0(x), f_1(x), \dots, f_n(x)\}$ , составляющие которого есть функции, отмечающие области оси  $x$ , в которых пересекается любое возможное число  $p$  ( $p = \overline{0, n}$ ) заданных интервалов  $[a_i, b_i]$ . Это и есть решение задачи 1 анализа изображения в 1-мерном пространстве.

Решение задачи 2 анализа изображения в одномерном пространстве отличается от изложенного выбором функции автомата-модели в виде

$$y = \Phi_n^k(x_1, \dots, x_n) = (x_{i_1}, \dots, x_{i_k})(\overline{x_{i_{k+1}} \vee \dots \vee x_{i_n}}), x_i, y \in \{0,1\}. \quad (12)$$

Итак, решение задач 1 и 2 анализа изображений (пространственных сцен) в двух- и трехмерном пространствах с помощью метода сечений сводится к решению этих задач в одномерном пространстве.

### Заключение

В настоящей статье на основе разработанных ранее математического аппарата непрерывной логики [1] и логической теории динамических конечных автоматов [2–4] решена задача построения автоматной модели для анализа сложных пространственных сцен (изображений) любой размерности. От более ранней работы автора [5] представленная модель отличается усовершенствованными расчетными формулами, что облегчит практическое приложение разработанных ранее методов. Эта модель дает возможность выполнять практические расчеты, связанные с анализом реальных пространственных сцен, возникающих в технике. С математической точки зрения предложенная модель интересна тем, что ее структурной реализацией оказывается некоторый динамический автомат, входные процессы которого моделируют отдельные объекты сцены, а выходные процессы – взаимоотношения этих объектов. Таким образом, анализ пространственной сцены, т. е. определение взаимоотношения объектов сцены, сводится к вычислению выходных процессов автомата-модели сцены по его входным процессам. Последнее выполняется хорошо известными методами динамической теории автоматов.

### Литература

1. Левин В. И. Непрерывная логика и ее применение // Информационные технологии. 1997. № 1. С. 17-22.
2. Левин В. И. Введение в динамическую теорию конечных автоматов. – Рига: Зинатне, 1975. – 376 с.
3. Левин В. И. Динамика логических устройств и систем. – М.: Энергия, 1980. – 224 с.
4. Левин В. И. Теория динамических автоматов. – Пенза: Пензенский государственный технический университет, 1995. – 408 с.
5. Левин В. И. Теория автоматов в задачах анализа сложных изображений // Наука и образование. 2005. № 2. – URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/49995.html> (дата обращения: 25.12.2017).

### References

1. Levin V. I. *Nepreryvnaya logika i ee primenenie* [Continuous Logic and Its Application]. *Informacionnye tehnologii*, 1997, no. 1, pp. 17-22 (in Russian).
2. Levin V. I. *Vvedenie v dinamicheskuyu teoriyu konechnyh avtomatov* [Introduction to Dynamical Theory of Finite Automata]. Riga, Zinatne, 1975. 376 p. (in Russian).
3. Levin V. I. *Dinamika logicheskikh ustroystv i system* [Dynamics of Logical Devices and Systems]. Moscow, Energiya, 1980. 224 p. (in Russian).
4. Levin V. I. *Teoriya dinamicheskikh avtomatov* [Theory of Dynamical Automata]. Penza, Penza State Technological University, 1995. 408 p. (in Russian).

5. Levin V. I. Teoriia avtomatov v zadachakh analiza slozhnykh izobrazhenii [Automata theory in problems of analysis of complex images]. *Science and Education*, 2005, no. 2. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/49995.html> (accessed 25 December 2017) (in Russian).

Статья поступила 26 декабря 2017 г.

### Информация об авторе

Левин Виталий Ильич – доктор технических наук, профессор, PhD, Full Professor. Заслуженный деятель науки РФ. Пензенский государственный технологический университет. Область научных интересов: логика; математическое моделирование в технике, экономике, социологии, истории; принятие решений; оптимизация; теория автоматов; теория надежности; распознавание; история науки; проблемы образования. E-mail: vilevin@mail.ru  
Адрес: 440039, Россия, г. Пенза, пр. Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11.

---

## Dynamic Automata and Analysis of Complex Spatial Scenes

V. I. Levin

**Relevance.** In architectural design, in the construction of robotic systems, in military affairs and in a number of other areas, the problem of analyzing the relationship between objects of spatial scenes (images) is of great importance. It is important to choose an appropriate model for such an analysis, which allows you to quickly perform the necessary calculations. **The purpose** of the article is to develop an automata-logical model for the analysis of spatial scenes and the corresponding logical methods for performing the necessary computations that differ from known models and methods using constructive automata models and logical computational methods. **Method.** To achieve this goal, it was suggested to replace the traditional numerical methods for the analysis of spatial scenes by a new method in which the analysis model is a dynamic finite automaton whose input processes model individual objects of the scene, and the output processes are the relationships of these objects. **The novelty** of the work consists in constructing an adequate automata model for the analysis of spatial scenes, which makes it possible to reduce this analysis to the calculation of the output processes of the automata-model by its input processes. **Result.** The article elaborates the automata-logical model for the analysis of spatial scenes and the methods of its investigation, which allow us to introduce new indicators of the relationship between objects of scenes and to calculate their values by logical methods.

**Keywords:** continuous logic, dynamic automaton, spatial scene, image, scene analysis.

### Information about Author

Vitaly Ilich Levin – Doctor of Technical Sciences, Full Professor. Honoured Scientist of Russia. Penza State Technological University. Field of Research: logic; mathematical modeling in technics, economics, sociology, history; decision making, optimization, recognition, automata theory, reliability theory, history of science, problems of education. E-mail: vilevin@mail.ru

Address: Russia, 440039, Penza, pr. Baydukova / Gagarin st., 1a/11.

Журнал «Системы управления, связи и безопасности» является научным рецензируемым периодическим электронным изданием. Цель журнала – максимально полное, оперативное и открытое информирование научной общественности об основных результатах научно-исследовательских работ в области теории управления, теории связи, теории безопасности, а также о новых тенденциях развития технологий соответствующих прикладных областей.

Периодичность выхода журнала – четыре номера в год.

Журнал «Системы управления, связи и безопасности» публикует только статьи, которые соответствуют основным тематическим разделам журнала:

1. Анализ новых технологий и перспектив развития систем управления, связи и безопасности.
2. Системы управления.
3. Интеллектуальные информационные системы.
4. Робототехнические системы.
5. Вычислительные системы.
6. Информационные процессы и технологии. Сбор, хранение и обработка информации.
7. Информационная безопасность.
8. Передача, прием и обработка сигналов. Радиоэлектронный мониторинг.
9. Системы связи и телекоммуникации.
10. Системы обеспечения безопасности.
11. Электронные и радиотехнические системы.
12. Моделирование сложных организационно-технических систем.
13. Объекты интеллектуальной собственности и инновационные технологии в области управления, связи и безопасности.

Публикация в журнале является научным печатным трудом.

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (№2187 Перечня) по следующим группам специальностей: 05.11.00, 05.12.00, 05.13.00, 05.27.00, 20.00.00.

Подробный перечень научных специальностей, которые соответствуют тематике журнала, опубликован [здесь](#).

Журнал доступен по адресу <http://sccs.intelgr.com>.

**Архив выпусков журнала** доступен по адресу <http://sccs.intelgr.com/arch.html>.

## *Правила для авторов*

### **Материалы, представляемые в редакцию**

1. Файл со статьей, оформленной по требованиям журнала.
2. Сканированную копию экспертного заключения об отсутствии в статье материалов, запрещенных к открытому опубликованию.
3. Авторы могут подготовить краткое сообщение рецензенту, дополнительно поясняющее отдельные элементы работы, их суть и новизну, рамки исследования, связь своей работы с имеющимися публикациями в предметной области. Данное сообщение необязательно, но, при его наличии, оно будет передано рецензенту вместе со статьей.

### **Порядок рецензирования и принятия статьи к публикации**

1. Авторский коллектив представляет в редакцию статью и сопроводительные материалы на адрес [sccs@intelgr.com](mailto:sccs@intelgr.com).
2. Редакция осуществляет проверку материалов на предмет соответствия требованиям к оформлению и представлению результатов. При необходимости технической правки статьи авторы уведомляются об этом.
3. Если замечаний по оформлению статьи нет, она проверяется в сервисах, выявляющих плагиат, и с результатами проверки передается на рецензирование. Редакция уведомляет авторов о передаче статьи на рецензирование.
4. Порядок проверки на плагиат и выбор сервиса для проверки определяется редакцией самостоятельно. Для проверки на плагиат редакцией используются Интернет-сервисы Антиплагиат, ТЕХТ, Content-watch, а также программы Etxt и Advego Plagiatus.
5. В случае положительного решения рецензентов о возможности публикации статьи авторы уведомляются об этом. В случае несовпадения мнений рецензентов о возможности публикации статьи, она передается на повторное рецензирование или рассматривается редакционной коллегией журнала, о чем уведомляется авторский коллектив. В случае решения рецензентов или редакционной коллегии журнала о невозможности публикации статьи авторы получают мотивированный отказ.
6. По решению рецензентов или редакционной коллегии статья может быть принята к публикации, но с доработками. В этом случае авторы должны в короткий срок переработать статью в соответствии с замечаниями рецензентов, либо дать мотивированный ответ по замечаниям. Если доработка статьи потребует значительного времени, авторы должны уведомить об этом редакцию.
7. После принятия статьи к публикации, авторы оплачивают редакционные расходы, связанные с публикацией статьи.
8. После оплаты редакционных расходов статья размещается в очередном номере журнала на сайте издательства. Авторы уведомляются о публикации их статьи по электронной почте.
9. После формирования очередного номера журнала данные об опубликованных в нем статьях в течение трех месяцев передаются в наукометрические базы учета научных публикаций.

## *Требования к оформлению статей, представляемых в редакцию*

Пример оформления статьи доступен по адресу

<http://sccs.intelgr.com/download/article.doc>

1. Статья представляется в формате Word 97/2000/XP с расширением **doc**.
2. Рекомендуемый объем статьи – **до 50 страниц**. Объем может быть увеличен, если этого требует логика изложения материала.
3. Размер страницы – А4. Все поля (верхнее, нижнее, правое и левое) по 2 см.
4. Текст статьи набирается шрифтом Times New Roman, размер шрифта 14 pt, одинарный междустрочный интервал, абзацный отступ 1,25 см, отступы между абзацами отсутствуют. В основном тексте допускаются выделения курсивом. Латинские буквы для обозначения переменных набираются курсивом; греческие, русские буквы, функции – прямым шрифтом. Цифровые индексы в обозначениях набираются прямым шрифтом.
5. Статья должна начинаться с индекса УДК, выровненного по левому краю. После индекса УДК следует пропуск строки.
6. Название статьи должно точно и однозначно характеризовать содержание статьи. Название статьи – полужирным шрифтом, выравнивание по центру без абзацного отступа. **Название писать строчными (маленькими) буквами**, используя заглавные буквы только там, где это необходимо (в начале первого слова, в названиях, именах собственных, сокращениях и т.п.). Не рекомендуется использовать в названии сокращения, кроме общепринятых в соответствующей предметной области. Точка после заглавия НЕ ставится. После названия статьи следует пропуск строки.
7. Фамилии и инициалы авторов указываются через запятую в последовательности, соответствующей личному вкладу в написание статьи. Фамилии авторов выравниваются по центру страницы без абзацного отступа. Между фамилией и первым инициалом, а также между инициалами ставится неразрывный пробел (Ctrl+Shift+пробел). После фамилий авторов следует пропуск строки.
8. Аннотация выполняется на русском и английском языке в соответствии с [рекомендациями по написанию авторского резюме](#). Оформление аннотации: размер шрифта **11pt**, курсив, абзацный отступ 1,25 см. Заголовки отдельных элементов в структуре аннотации выделяются жирным шрифтом. После аннотации следует пропуск строки.
9. Ключевые слова оформляются так же, как и аннотация, и должны содержать основные понятия и термины, употребляемые в статье. Ключевые слова должны формулироваться таким образом, чтобы при семантическом поиске по ним можно было найти данную статью потенциально заинтересованным ученым. После абзаца с ключевыми словами следует пропуск строки.
10. Для структуризации статьи рекомендуется основной текст разделить по частям, имеющим условные подзаголовки «Введение», «Постановка задачи» («Формализация задачи»), «Модель...» («Методика...», «Метод...»), «Результаты моделирования» («Обоснование...»), «Выводы». Подзаголовки выполняются полужирным шрифтом и выравниваются по центру страницы без абзацного отступа. Перед подзаголовками следует пропуск одной строки.
11. Таблицы выравниваются по центру без абзацного отступа. Текст внутри таблиц может выполняться шрифтом от 10pt до 14pt, в зависимости от степени информационной загрузки ячеек таблиц. Таблицы нумеруются по порядку упоминания, а их названия оформляются в виде «Таблица 1 – Название таблицы» и выравниваются по центру без абзацного отступа. Если таблица выполняется на

- нескольких страницах, необходимо выставлять признак заголовка для первой строки с наименованиями столбцов, либо дублировать первую строку с наименованиями на следующей странице.
12. Рисунки выполняются в виде внедренных объектов векторной графики, выполненных в формате MS Visio (**vsd**) или в форматах метафайлов Windows (**wmf** или **emf**). В случае невозможности представления рисунков в векторном виде, рисунки выполняются в растровых форматах **jpg** или **png**. Нумерация рисунков последовательная по мере упоминания в статье в виде «Рис. 1. Название рисунка». Номер и название рисунка выравниваются по центру без абзацного отступа. До рисунка и после его названия вставляется пропуск строки. Допускается выполнение рисунков, расположенных параллельно друг другу на одном горизонтальном уровне. В этом случае рисунки и их названия помещаются в таблицу с прозрачными границами.
  13. Формулы выполняются в редакторе формул MathType или Microsoft Equation 3.0. Формулы могут быть набраны в основном тексте со вставкой специальных математических символов через меню «Вставка-Символы». **Запрещается набирать формулы во встроенном редакторе формул Microsoft Office 2007 и выше.** Основной шрифт формул набираемых в MathType и Microsoft Equation 3.0, 14 pt. Формулы выравниваются по левому краю с абзацным отступом 2,5 см. При необходимости переноса формул используется общепринятая математическая запись переноса. Формулы, на которые есть ссылки в тексте статьи, должны быть пронумерованы. Номер формулы проставляется с правого края страницы. При оформлении формул, не следует вставлять дополнительные пропуски строки до и после формул.
  14. Для облегчения редактирования статьи просим выделять **желтым маркером** номера формул, номера рисунков, ссылки на литературу, ссылки на формулы и рисунки в основном тексте статьи.
  15. В конце статьи, по желанию авторов, могут быть приведены высказывания благодарности за помощь в исследованиях, сведения о грантах, НИРах и ОКРах, в рамках которых выполнялась работа, а также сведения об источниках финансирования исследований. Также в конце статьи авторами могут быть представлены приложения, где содержатся листинги программ, на основе которых выполнялось моделирование, различные объемные таблицы и графики, а также другие элементы, которые с одной стороны являются неотъемлемой частью исследования, а с другой - загромождают текст статьи.
  16. Список используемых источников оформляется в соответствии с [требованиями к оформлению библиографических ссылок нашего журнала](#) после подзаголовка «Литература», который выполняется полужирным шрифтом, выравниваются по центру страницы без абзацного отступа. Нумерация ссылок определяется порядком их упоминания в статье. При формировании списка литературы не следует использовать функцию автоматического формирования нумерованного списка. После подзаголовка «Reference» литература дублируется на английском языке. При оформлении списка литературы и его перевода редакция настоятельно просит авторов пользоваться и соблюдать требования и [рекомендации по оформлению списка литературы и его переводу на английский язык](#). После списка литературы и Reference следует пропуск строки.
  17. После списка Reference указывается дата первого представления статьи в редакцию. Данный абзац выделяется полужирным шрифтом, выравнивание по правому краю страницы.
  18. В конце статьи указывается информация об авторах. Данные сведения для каждого соавтора обязательно должны содержать: фамилию, имя, отчество

полностью, научную степень, научное звание, должность и полное наименование организации, телефон и e-mail.

19. Статья завершается текстовым блоком, дублирующим название статьи, фамилии и инициалы авторов, аннотацию статьи и ключевые слова на английском языке. Данный текстовый блок начинается с новой страницы и его элементы оформляются так же, как соответствующие элементы на русском языке в начале статьи.

Требования к оформлению блока, содержащего сведения об авторах. Нижеуказанные сведения приводятся по каждому автору отдельно.

1. Фамилия, Имя, Отчество на русском языке.
  2. Научная степень и научное звание (если есть) на русском языке.
  3. Место работы с указанием страны и города на русском языке. Указывается официальное название, желательно из устава, в именительном падеже. Так как базы цитирования (например, РИНЦ) «привязывают» статью к определенному автору в определенной организации, то неверное указание места работы может привести к тому, что Ваша статья может отсутствовать в списке Ваших публикаций в базах цитирования, а также в списке публикаций сотрудников Вашей организации.
  4. Должность на русском языке.
  5. Область научных интересов – на русском языке.
  6. Адрес электронной почты. Убедительная просьба указывать существующий и действующий адрес электронной почты для КАЖДОГО соавтора.
  7. Корреспондентский почтовый адрес (с индексом) для контактов с авторами статьи. Данный адрес можно указать один на всех авторов. Можно указать как рабочий (предпочтительно), так и домашний (по желанию) адрес. Обратите внимание на то, что эта информация будет опубликована в открытом доступе.
  8. Телефон для связи.
- 
1. Фамилия, Имя, Отчество на английском языке.
  2. Научная степень и научное звание (если есть) на английском языке. При затруднениях, связанных с переводом, просим воспользоваться [рекомендациями по переводу должности, ученой степени и ученого звания](#).
  3. Международное название места работы с указанием страны и города на английском языке (желательно, в соответствии с уставом). Переводить по буквам аббревиатуры в названии НЕ НУЖНО. Редакция просит Вас воздержаться от использования аббревиатур и сокращений, кроме аббревиатур, указывающих на организационно-правовую форму места работы автора (ФГБОУ, ООО, ОАО и т. п.).
  4. Должность на английском языке. При затруднениях, связанных с переводом, просим воспользоваться [рекомендациями по переводу должности, ученой степени и ученого звания](#).
  5. Область научных интересов – на английском языке (Field of research: ...).
  6. Адрес электронной почты. Убедительная просьба указывать существующий и действующий адрес электронной почты для КАЖДОГО соавтора.
  7. Корреспондентский почтовый адрес (с индексом) для контактов с авторами статьи. Данный адрес можно указать один на всех авторов. Можно указать как рабочий (предпочтительно), так и домашний (по желанию) адрес. Обратите внимание на то, что эта информация будет опубликована в открытом доступе.
  8. Телефон для связи.

Следует учесть, что данные, приведенные в сведениях об авторах (электронный и обычный адрес, телефоны и факс), должны позволять редакции быстро связаться с авторами статей. Если такая связь оказывается невозможной, то это может привести к задержке в публикации статьи. Следует иметь в виду, что редакция не имеет возможности для ведения длительных междугородних телефонных переговоров. Поэтому настоятельно рекомендуется всю переписку с редакцией вести по электронной почте. Редакция настоятельно рекомендует приводить действующие и часто просматриваемые электронные адреса.

При написании работ просим авторов воспользоваться [рекомендациями по написанию научных статей](#).

*Минимальные системные требования:*

- процессор: Intel x86, x64, AMD x86, x64 не менее 1 ГГц;
- оперативная память RAM ОЗУ: не менее 512 МБайт;
- свободное место на жестком диске (HDD): не менее 120 МБайт;
- операционная система: Windows XP и выше;
- Adobe Acrobat Reader;
- дисковод CD-ROM;
- мышь.

ООО «Корпорация «Интел Групп»

**Системы управления, связи и безопасности**

Научный журнал

*Адрес редакции:*

197372, Санкт-Петербург, пр. Богатырский, д. 32, к. 1 лит. А, пом. 6Н.

Тел.: (812) 945-50-63.

<http://sccs.intelgr.com>

E-mail: [sccs@intelgr.com](mailto:sccs@intelgr.com)

Свидетельство о регистрации ЭЛ № ФС 77 - 61239 от 03.04.2015 г.  
Территория распространения - Российская Федерация и зарубежные страны