

## НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ЗЕМЛИ

### HIGH TECHNOLOGIES IN EARTH SPACE RESEARCH

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

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

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

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

#### ИНДЕКСИРОВАНИЕ ЖУРНАЛА H&ES RESEARCH

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

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

Всем авторам, желающим разместить научную статью в журнале, необходимо оформить ее согласно требованиям и направить материалы на электронную почту: [HT-ESResearch@yandex.ru](mailto:HT-ESResearch@yandex.ru).

С требованиями можно ознакомиться на сайте: [www.H-ES.ru](http://www.H-ES.ru). Все номера журнала находятся в свободном доступе на сайте.

Язык публикаций: русский, английский.  
Периодичность выхода – 6 номеров в год.

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

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

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

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

#### JOURNAL H&ES RESEARCH INDEXING

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

All authors wishing to post a scientific article in the journal, you must register it according to the requirements and send the materials to your email: [HT-ESResearch@yandex.ru](mailto:HT-ESResearch@yandex.ru).

The requirements are available on the website: [www.H-ES.ru](http://www.H-ES.ru). All issues of the journal are in a free access on a site.

Language of publications: Russian, English.  
Periodicity – 6 issues per year.



**Учредитель:**  
 ООО «ИД Медиа Паблишер»

**Издатель:**  
 ДЫМКОВА С.С.

**Главный редактор:**  
 ЛЕГКОВ К.Е.

**Редакционная коллегия:**  
**БОБРОВСКИЙ В.И.**, д.т.н., доцент;  
**БОРИСОВ В.В.**, д.т.н., профессор,  
 Действительный член академии  
 военных наук РФ;  
**БУДКО П.А.**, д.т.н., профессор;  
**БУДНИКОВ С.А.**, д.т.н., доцент,  
 Действительный член Академии  
 информатизации образования;  
**ВЕРХОВА Г.В.**, д.т.н., профессор;  
**ГОНЧАРОВСКИЙ В.С.**, д.т.н., профессор,  
 заслуженный деятель науки  
 и техники РФ;  
**КОМАШИНСКИЙ В.И.**, д.т.н., профессор;  
**КИРПАНЕВ А.В.**, д.т.н., доцент;  
**КУРНОСОВ В.И.**, д.т.н., профессор,  
 академик Международной академии  
 информатизации, Действительный член  
 Российской академии естественных наук;  
**МОРОЗОВ А.В.**, д.т.н., профессор,  
 Действительный член Академии  
 военных наук РФ;  
**МОШАК Н.Н.**, д.т.н., доцент;  
**ПАВЛОВ А.Н.**, д.т.н., профессор;  
**ПРОРОК В.Я.**, д.т.н., профессор;  
**СЕМЕНОВ С.С.**, д.т.н., доцент;  
**СИНИЦЫН Е.А.**, д.т.н., профессор;  
**ШАТРАКОВ Ю.Г.**, д.т.н., профессор,  
 заслуженный деятель науки РФ.

**N&ES Research** зарегистрирован  
 Федеральной службой по надзору  
 за соблюдением законодательства в  
 сфере массовых коммуникаций и охране  
 культурного наследия.

Свидетельство о регистрации СМИ  
 ПИ № ФС 77-60899 от 02.03.2015  
 Территория распространения:  
 Российская Федерация, зарубежные  
 страны

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

**Адрес издателя:**  
 111024, Россия, Москва,  
 ул. Авиамоторная, д. 8, офис 512-514.

**Адрес редакции:**  
 194044, Россия, Санкт-Петербург,  
 Лесной Проспект, 34-36, к. 1,  
 Тел.: +7(911) 194-12-42.

**Адрес типографии:**  
 Россия, Москва, ул. Складочная, д. 3, кор. 6.

## СОДЕРЖАНИЕ

### АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

**Аллилуева Н.В., Руденко Э.М., Семикина Е.В.**  
 Маршрутизация на графе, теоретико-числовые целевые функции  
 и генетический алгоритм ..... 4

**Ньян Мин Хтет, Волков И.В.**  
 Исследование напряженно-деформированного состояния  
 и вида напряженного состояния модельного замкнутого крыла  
 с использованием спекл-интерферометрии ..... 15

### РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

**Алексеев В.Г., Коржик В.И.**  
 Погружение цифровых водяных знаков в аудиосигналы с помощью  
 использования частотно селективного изменения фазы..... 22

**Винограденко А.М., Меженев А.В., Будко Н.П.**  
 К вопросу обоснования понятийного аппарата неразрушающего  
 экспресс-контроля технического состояния оборудования системы связи  
 и радиотехнического обеспечения аэродрома ..... 30

**Баранов В.А., Кобышев М.Ю., Привалов А.А., Шестаков А.В.**  
 Верификация криптографических алгоритмов на основе использования  
 метода симуляции двоичных случайных последовательностей с заданными  
 статистическими свойствами ..... 45

**Кириченко С.И., Курчидис В.А.**  
 Формализованное представление операций настройки радиоэлектронной  
 аппаратуры для формирования ремонтной информации ..... 53

**Потапов С.Е.**  
 Реляционно-операторный метод математического моделирования передачи  
 многопакетных сообщений по виртуальным маршрутам сети радиосвязи ..... 61

### ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

**Носов М.И., Борунов Д.Н.**  
 Методологические основы обоснования системы показателей информационной  
 системы для поддержки принятия решений управлением ракетных войск  
 и артиллерии в операциях ..... 74



# CONTENTS

## AVIATION, SPACE-ROCKET HARDWARE

**Alliluyeva N.V., Rudenko E.M., Semikina E.V.**  
Routing on a graph of number-theoretic objective function and genetic algorithm ..... 4

**Nyan Min Htet, Volkov I.V.**  
Study of stress-strain state and type of stress state of a closed model  
of the wing using speckle interferometry..... 15

## RF TECHNOLOGY AND COMMUNICATION

**Alekseev V.G., Korzhik V.I.**  
Embedding of digital watermark signals with the use of a frequency selective  
phase changing..... 22

**Vinogradenko A.M., Mezhenov A.V., Budko N.P.**  
To the question of substantiation of the conceptual apparatus nondestructive  
express control of technical condition equipment of communication system  
and aerodrome radio engineering support..... 30

**Baranov V.A., Konyshov M.Y., Privalov A.A., Shestakov A.V.**  
Verification of cryptographic algorithms based on the use of method simulation  
binary random sequences with specified statistical properties ..... 45

**Kirichenko S.I., Kurchidis V.A.**  
Formalized representation of the radioelectronic equipment tuning process  
for information support means of technical complexes repair ..... 53

**Potapov S.E.**  
Relative-operative method of mathematical modeling transmission of multi-package  
messages along the virtual routes of the radio communication network ..... 61

## INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

**Nosov M.I., Borunov D.N.**  
Methodological bases of substantiation of system of indicators  
of information system for decision support by management of rocket troops  
and artillery in operations ..... 74

**Founder:**  
"Media Publisher", LLC

**Publisher:**  
DYMKOVA S.S.

**Editor in chief:**  
LEGKOV K.E.

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

Journal H&ES Research has been  
registered by the Federal service on  
supervision of legislation observance  
in sphere of mass communications and  
cultural heritage protection.

Media Registration Certificate  
PI No. FS77-60899.

Date of issue: March 2, 2015.  
Distribution Territory: Russian Federation,  
foreign countries

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

**Address of publisher:**  
111024, Russia, Moscow,  
st. Aviamotornaya, 8, office 512-514;

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

**Address of printing house:**  
Russia, Moscow, st. Skladochnaya, 3, h. 6



doi: 10.24411/2409-5419-2018-10290

# МАРШРУТИЗАЦИЯ НА ГРАФЕ, ТЕОРЕТИКО-ЧИСЛОВЫЕ ЦЕЛЕВЫЕ ФУНКЦИИ И ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ

**АЛЛИЛУЕВА**

**Наталья Владимировна<sup>1</sup>**

**РУДЕНКО**

**Эдуард Михайлович<sup>2</sup>**

**СЕМИКИНА**

**Елена Викторовна<sup>3</sup>**

## АННОТАЦИЯ

Рассматривается математический подход к расчету маршрутов беспилотных летательных аппаратов на Эйлеровом графе реперных точек на местности. Проводится сравнение методов построения целевой функции графа на основе алгебраического и теоретико-числового подхода. Целевая функция графа в виде многочлена от нескольких переменных минимальное нулевое значение достигает на наборах номеров вершин графа, которые являются замкнутыми маршрутами на графе. Алгебраический подход приводит к целевой функции в виде суммы нескольких многочленов. Первое слагаемое учитывает информацию о постоянстве минимальной длины замкнутого маршрута Эйлерова графа, проходящего по всем ребрам один раз. Другие слагаемые отражают комбинаторную повторяемость номеров вершин Эйлерова графа в оптимальных замкнутых маршрутах минимальной длины, равной половине их кратности. Анализ алгебраической целевой функций в виде суммы многочленов показывает на примере конкретного графа возможность нахождения замкнутых маршрутов на различных Эйлеровых моделях данного графа. Теоретико-числовой подход приводит к построению целевой функции в виде одного многочлена. Теоретической основой построения целевой функции при данном подходе являются теоремы об однозначности представления целых чисел в виде суммы в  $s$ -ической системе счисления и однозначности представления рационального числа в виде несократимого отношения произведений степеней различных простых чисел. Математическая модель расчета маршрутов на графе основана на минимизации генетическим алгоритмом построенных  $s$ -ических и  $r$ -мультипликативных целевых функций графа. Исследована эффективность вычисления маршрутов с помощью построенных целевых функций графа. Минимальные временные затраты достигаются при вычислении маршрутов с помощью целой  $s$ -ической целевой функции. Теоретико-числовой подход дает возможность построения целевых функций для сверхбольших графов и указывает на связь с распределением простых чисел и с теорией  $p$ -адических чисел. Все построенные теоретико-числовые целевые функции обладают особенностью достижения минимума равного нулю только на оптимальных замкнутых маршрутах графа минимальной длины. Показана взаимосвязь прикладной задачи маршрутизации беспилотных летательных аппаратов на местности с математической задачей оптимизации на графах средствами теории чисел и генетического алгоритма.

## Сведения об авторах:

<sup>1</sup>ведущий специалист акционерного общества «Научно-производственное предприятие "Радар ММС"», г. Санкт-Петербург, Россия, allilueva\_nv@radar-mms.com

<sup>2</sup>к.т.н., доцент филиала Военной академии Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого, г. Серпухов, Россия, eduard5529@yandex.ru

<sup>3</sup>преподаватель филиала Военной академии Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого, г. Серпухов, Россия, labinfo\_serp@inbox.ru

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** маршрутизация; графы; целевые функции; генетический алгоритм; математическая модель.

**Для цитирования:** Аллилуева Н.В., Руденко Э.М., Семикина Е.В. Маршрутизация на графе, теоретико-числовые целевые функции и генетический алгоритм // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 6. С. 4-14. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10290

## Введение

Нахождение замкнутых маршрутов БПЛА (беспилотных летательных аппаратов) на графе множества реперных точек формализуется в оптимизационную задачу на математическом графе [1–3]. Расчет маршрутов производится с помощью минимизации неотрицательной целевой функции, которая достигает нулевого значения на замкнутых маршрутах, проходящих по всем ребрам графа и содержащих минимальное их количество. Целевая функция (ЦФ) может быть построена с помощью суммы нескольких неотрицательных многочленов от нескольких переменных<sup>1</sup> [4–8]. Это так называемый алгебраический подход. В данной статье рассматривается теоретико-числовой подход<sup>2</sup> к построению целевой функции графа, что упрощает ее программный код, позволяет записать ее одним выражением, что в итоге обеспечивает автоматизацию процессов планирования маршрутов в ходе полета БПЛА.

## Алгебраический подход в построении целевой функции графа

Проблематику в построении ЦФ алгебраическим методом можно проследить при увеличении размерности графа, т.е. при увеличении числа вершин и ребер. Для этого рассмотрим построение ЦФ и ОЗМ (множества оптимальных замкнутых маршрутов) на Эйлеровом графе **v8e16**, состоящем из 8 вершин и 16 ребер (рис. 1).

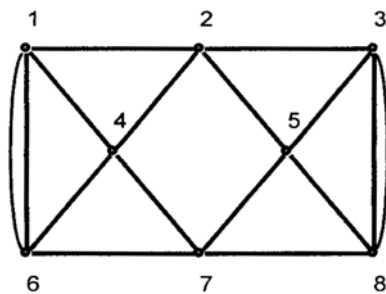


Рис. 1. Граф **v8e16**

ЦФ этого графа рассчитывается по зависимости [9–11]

$$Z(\mathbf{m}) = \sum_{i=1}^5 \text{abs}(Z_i(\mathbf{m})) \quad (1)$$

при разделяющей функции

$$t = f(x, y) = 2xy - 3(x + y) + 11,$$

где  $x$  и  $y$  — номера вершин.

Так как рассматривается неориентированный граф, то разделяющая функция должна быть симметрической, то есть  $f(x, y) = f(y, x)$ .

Петли и ребра, не принадлежащие графу, но которые могут быть сгенерированы при подсчете целевой функции генетическим алгоритмом, разделяющей функцией переводятся в множество:

$$P = [7 \ 7 \ 11 \ 19 \ 31 \ 47 \ 67 \ 91 \ 5 \ 3 \ 1 \ 0 \ 11 \ 12 \ 13 \ 14 \ 20 \ 23 \ 24 \ 39 \ 38 \ 65],$$

где

$$\begin{aligned} f(1,1) = 7; & \quad f(2,2) = 7; & \quad f(3,3) = 11; & \quad f(4,4) = 19; \\ f(5,5) = 31; & \quad f(6,6) = 47; & \quad f(7,7) = 67; & \quad f(8,8) = 91; \\ f(1,3) = 5; & \quad f(1,5) = 3; & \quad f(1,7) = 1; & \quad f(1,8) = 0; \\ f(2,6) = 11; & \quad f(2,7) = 12; & \quad f(2,8) = 13; & \quad f(3,4) = 14; \\ f(3,6) = 20; & \quad f(3,7) = 23; & \quad f(4,5) = 24; & \quad f(4,8) = 39; \\ f(5,6) = 38; & \quad f(6,8) = 65. \end{aligned}$$

Допустимые на графе ребра разделяющей функцией переводятся в множество:

$$S = [6 \ 4 \ 2 \ 8 \ 9 \ 10 \ 17 \ 26 \ 29 \ 34 \ 45 \ 52 \ 56 \ 78], \text{ где}$$

$$\begin{aligned} f(1,2) = 6; & \quad f(1,4) = 4; & \quad f(1,6) = 2; & \quad f(2,3) = 8; \\ f(2,4) = 9; & \quad f(2,5) = 10; & \quad f(3,5) = 17; & \quad f(3,8) = 26; \\ f(4,6) = 29; & \quad f(4,7) = 34; & \quad f(5,7) = 45; & \quad f(5,8) = 52; \\ f(6,7) = 56; & \quad f(7,8) = 78. \end{aligned}$$

Имеем  $P \cap S = \emptyset$ .

Многочлен на множестве  $S \cup P$ , присваивающий ребрам графа весовые значения, имеет вид

$$I(t) = 1 + c \cdot \text{abs}((t-2)(t-4)(t-6)(t-8)(t-9)(t-10) \times (t-17)(t-26)(t-29)(t-34)(t-45)(t-52)(t-56)(t-78)),$$

где  $c > 0$  — выравнивающий коэффициент на множестве  $P$ .

Многочлен  $I(t)$  на множестве  $S$  принимает значение равное единице, а на  $P$  больше  $I(t) > 1$ .

Многочлен  $I(t)$  может быть построен как интерполяционный, принимающий на  $S$  значение равное единице, а на  $P$  больше единицы.

Первое слагаемое ЦФ  $Z_1(\mathbf{m})$  определяется по формуле (2)

$$Z_1(\mathbf{m}) = Z_1(x_1, x_2, \dots, x_{17}) = \sum_{i=1}^{16} I(f(x_i, x_{i+1})) - 16 \quad (2)$$

Второе слагаемое определяется по формуле (3) и задает модели Эйлера графа

$$Z_2(\mathbf{m}) = Z_2(x_1, x_2, \dots, x_{17}) = \sum_{i=1}^{16} x_i \cdot x_{i+1} - 330. \quad (3)$$

<sup>1</sup>Воскресенский В. Е. Бирациональная геометрия линейных алгебраических групп и модули Галуа. Алгебраическая геометрия – 2, Итоги науки и техн. Сер. Современ. мат. и ее прил. Темат. обз., 24, М.: ВИНТИ, 2001. С. 5–156.

<sup>2</sup>Боревич З. И., Шафаревич И. Р. Теория чисел. Изд. 4-е. М.: ЛЕНЕНД. 2019. 504 с.



Следующие слагаемые (4)-(6)

$$Z_3(\mathbf{m}) = \sum_{i=1}^{17} x_i - 2 \sum_{i=1}^8 i - 1, \quad (4)$$

$$Z_4(\mathbf{m}) = \sum_{i=1}^{17} x_i^2 - 2 \sum_{i=1}^8 i^2 - 1^2, \quad (5)$$

$$Z_5(\mathbf{m}) = \sum_{i=1}^{17} x_i^3 - 2 \sum_{i=1}^8 i^3 - 1^3, \quad (6)$$

учитывают повторяемость номеров вершин в ОЗМ, равной половине их кратности. Первая вершина с номером 1, с которой начинается и заканчивается маршрут, встречается три раза, так как в замкнутом маршруте начальную и конечную вершину считают за одну<sup>3</sup>.

В ЦФ графа (1)  $Z(\mathbf{m}) = Z(m_1, m_2, \dots, m_n)$ , где  $\mathbf{m} = (m_1, m_2, \dots, m_n)$  ОЗМ и  $m_i \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$ ,  $i = 1, \dots, 17$ . Число возможных вариантов для наборов (не обязательно ОЗМ), которые можно получить из чисел  $\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$  длиной 15 равно числу  $8^{15} = 35184372088832$  (если исключить начальную и конечную вершину графа **v8e16** с номером 1). Например, маршрут  $\mathbf{m} = (1, 2, 3, 8, 7, 6, 1, 4, 2, 5, 3, 8, 5, 7, 4, 6, 1)$  является ОЗМ для Эйлера графа (рис. 1).

Отсюда следует, что при ограниченной вычислительной производительности ЭВМ для расчета ОЗМ прямым перебором понадобится несколько суток. ГА позволяет эффективно за короткое время решить систему уравнений целочисленного программирования (1)

$$\begin{aligned} Z(\mathbf{m}) = 0 &\Leftrightarrow Z_1(\mathbf{m}) = 0; \\ Z_2(\mathbf{m}) &= 0; \\ Z_3(\mathbf{m}) &= 0; \\ Z_4(\mathbf{m}) &= 0; \\ Z_5(\mathbf{m}) &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Таким образом, с помощью ГА [12–13] в цикле по изменению фактора кроссовера можно получить конечное число ОЗМ, размножив их с помощью преобразований группы автоморфизмов, разрезания в промежуточной вершине маршрута и сшивания в одинаковых вершинах начала и конца. Наконец, после прочтения всех полученных таким образом маршрутов в обратном порядке, получается во много раз большее количество ОЗМ, достаточное для решения задачи планирования маршрутов полета одного или группы БПЛА.

Применяя ГА при числе поколений ‘Generations’ = 100 и числе особей в популяции ‘PopulationSize’ = 360, полу-

чим полную сходимость для всех 20-ти значений фактора кроссовера из диапазона от 0,05 до 1 с шагом 0,05 (рис. 2).

На рис. 2 значение ЦФ равное нулю говорит о достижении минимума при различных значениях фактора кроссовера. Время вычисления 20 ОЗМ составило на компьютере с частотой 3,4 ГГц 105,83 с. Это показывает высокую эффективность ГА по сравнению с методом прямого перебора.

В ходе подсчета получено 18 ОЗМ, которые приведены в табл. 1, и два набора:

$$\begin{aligned} \mathbf{n}_1 &= (1\ 4\ 7\ 6\ 1\ 2\ 5\ 3\ 8\ 3\ 8\ 5\ 7\ 6\ 4\ 2\ 1); \\ \mathbf{n}_2 &= (1\ 4\ 6\ 1\ 2\ 3\ 8\ 3\ 8\ 7\ 5\ 2\ 5\ 7\ 6\ 4\ 1), \end{aligned}$$

являющиеся нулями всех уравнений целевой функции (7), но которые не являются оптимальными замкнутыми маршрутами на графе **v8e16** (см. рис. 1), так как в них ребра (3, 8) и (5, 7) имеют кратность, равную трем и двум соответственно (табл. 1).

Это показывает неточность алгебраического подхода к построению целевой функции графа, недостаточность количества слагаемых в математической форме записи (1), а также ограниченность учета только комбинаторных свойств повторяемости номеров вершин в маршруте. Появление ложных наборов не проявлялось для графов с меньшим числом вершин и ребер, но было выявлено на данном графе.

Наборы  $\mathbf{n}_1$  и  $\mathbf{n}_2$  удовлетворяют уравнениям (7), но им соответствуют маршруты на других моделях Эйлера графа (МЭГ), приведенные на рис. 3 и 4. Эти МЭГ содержат все 8 вершин и имеют 16 ребер, но среди них много кратных и они не содержат все ребра графа **v8e16**. Получение наборов  $\mathbf{n}_1$  и  $\mathbf{n}_2$ , не являющихся ОЗМ графа **v8e16**, произошло по причине увеличения размерности графа и из-за того, что из пяти выражений (2)–(6) только в  $Z_1(\mathbf{m})$  учитывается информация о весе ребер графа **v8e16**, равным единице у каждого из них. Остальные четыре выражения

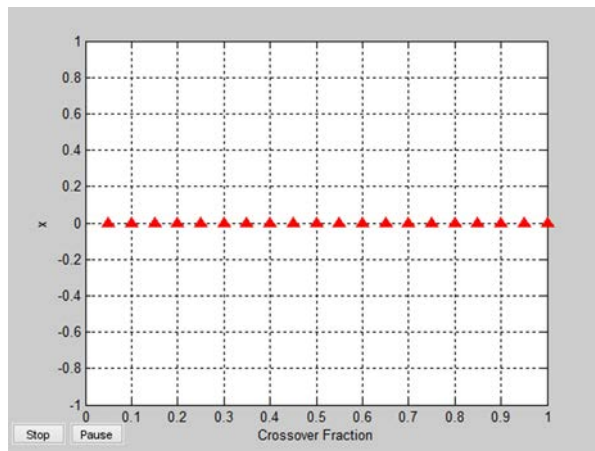


Рис. 2. График сходимости целевой функции в зависимости от фактора кроссовера

<sup>3</sup>Звонкин А.К., Ландо С.К. Графы на поверхностях и их вложения. М.: МЦНМО. 2010. 480 с.

зависят от номеров вершин. Причем, выражения (4), (5) и (6) показывают, что функции вершин графа будут на наборах  $\mathbf{n}_1$  и  $\mathbf{n}_2$  выполняться при любой сумме  $k$ -степеней  $x^k$ .

Таблица 1

Множество ОЗМ графа **v8e16**,  
 полученное генетическим алгоритмом

№	ОЗМ
1	(1 2 5 3 8 3 2 4 7 5 8 7 6 1 4 6 1)
2	(1 2 5 7 6 1 4 7 8 5 3 8 3 2 4 6 1)
3	(1 2 5 8 3 5 7 6 1 6 4 2 3 8 7 4 1)
4	(1 4 7 6 4 2 3 8 3 5 7 8 5 2 1 6 1)
5	(1 6 1 4 6 7 8 3 8 5 7 4 2 3 5 2 1)
6	(1 6 4 1 6 7 4 2 3 8 3 5 7 8 5 2 1)
7	(1 6 4 2 3 8 3 5 8 7 6 1 4 7 5 2 1)
8	(1 6 4 2 5 8 7 4 1 2 3 8 3 5 7 6 1)
9	(1 6 4 7 5 3 8 3 2 4 1 6 7 8 5 2 1)
10	(1 6 7 8 3 8 5 2 4 1 2 3 5 7 4 6 1)
11	(1 6 7 8 3 8 5 2 3 5 7 4 2 1 4 6 1)
12	(1 6 7 8 3 5 8 3 2 5 7 4 6 1 4 2 1)
13	(1 6 7 8 3 5 2 1 6 4 7 5 8 3 2 4 1)
14	(1 6 7 8 3 2 4 7 5 3 8 5 2 1 4 6 1)
15	(1 6 7 5 3 8 3 2 1 6 4 7 8 5 2 4 1)
16	(1 6 7 4 2 3 8 3 5 8 7 5 2 1 4 6 1)
17	(1 6 4 7 8 5 2 3 8 3 5 7 6 1 4 2 1)
18	(1 6 4 7 5 8 7 6 1 2 3 8 3 5 2 4 1)

Следовательно, при увеличении размерности графа, подход к построению ЦФ с помощью наращивания числа слагаемых для отсеивания ложных наборов и отбора только ОЗМ является неэффективным и требует проведения в каждом конкретном случае исследования. Пример построения ЦФ графа **v8e16** показывает, что для отсеива-

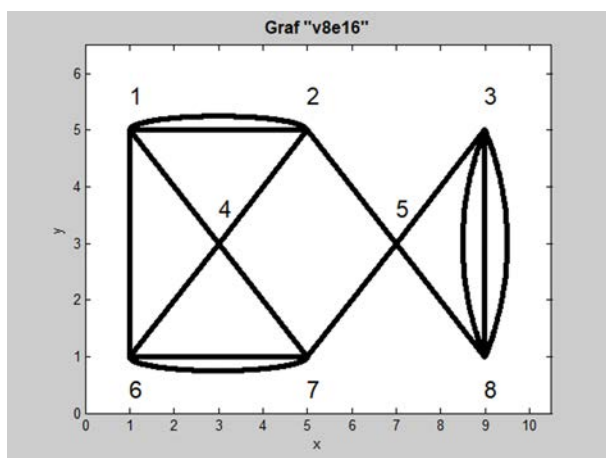


Рис. 3. МЭГ, отвечающая набору  $\mathbf{n}_1 = (1 4 7 6 1 2 5 3 8 3 8 5 7 6 4 2 1)$

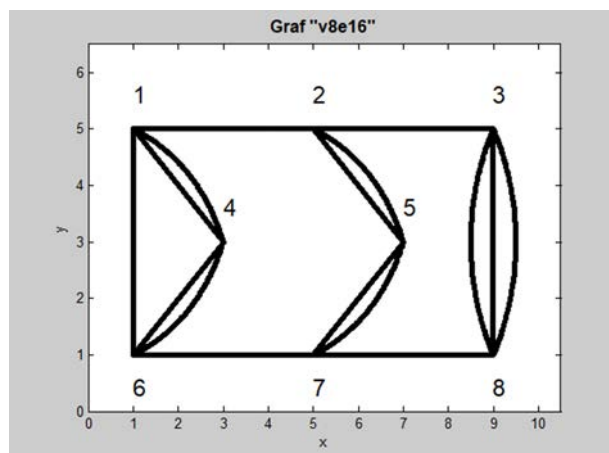


Рис. 4. МЭГ, отвечающая набору  $\mathbf{n}_2 = (1 4 6 1 2 3 8 3 8 7 5 2 5 7 6 4 1)$

ния таких наборов, как  $\mathbf{n}_1$  и  $\mathbf{n}_2$ , при большой размерности графа необходимо изменить первое слагаемое ЦФ, так, чтобы каждому ребру был присвоен индивидуальный вес, сумма которых содержала бы информацию о каждом ребре и эта информация не смешивалась с информацией других ребер. Число 16 в выражении (2) не имеет структуры носителя индивидуальной информации о каждом из ребер графа, как это будет следовать ниже.

**Теоретико-числовой подход построения s-ических и p-мультипликативных целевых функций графа**

Структурой однозначного представления числа в виде слагаемых обладают s-ические числа, которые применяются в системах счисления по основанию натурального числа s и которые имеют вид суммы

$$z = a_{-k} \cdot s^{-k} + \dots + a_{-1} \cdot s^{-1} + a_0 + a_1 \cdot s + \dots + a_n \cdot s^n, \quad (8)$$

где s — натуральное число;

$a_i$  — целое число удовлетворяющее условию  $0 \leq a_i < s$ .

Числа вида (8) обладают особенностью единственности представления чисел такого вида z. Поэтому, например, для графа **v8e16** можно в качестве весов ребер графа рассмотреть числа  $a_i \cdot s^i$  ( $i = -k, -k + 1, \dots, 1, 0, 1, \dots, n$  и  $k + n + 1 = 14$ ), где коэффициент  $a_i$  равен кратности i-го ребра. Так как ребра (1,6) и (3,8) (рис. 1) имеют кратность равную двум, то основание системы счисления берется  $s \geq 3 > 2$ . Все остальные ребра имеют кратность равную единице и поэтому  $a_i = 1$ , а их веса равны  $s^i$  [14].

Отсюда следует, что ребра графа **v8e16** (см. рис. 1) будут иметь веса, например, при значениях  $k = 8, n = 5$ :

$$\begin{aligned} w_1 &= w(1,2) = s^{-8}; w_2 = w(1,4) = s^{-7}; w_3 = w(1,6) = s^{-6}; \\ w_4 &= w(2,3) = s^{-5}; w_5 = w(2,4) = s^{-4}; w_6 = w(2,5) = s^{-3}; \\ w_7 &= w(3,5) = s^{-2}; w_8 = w(3,8) = s^{-1}; w_9 = w(4,6) = s^0; \\ w_{10} &= w(4,7) = s^1; w_{11} = w(5,7) = s^2; w_{12} = w(5,8) = s^3; \\ w_{13} &= w(6,7) = s^4; w_{14} = w(7,8) = s^5, \end{aligned}$$

где  $k$  — число отрицательных степеней;

$n$  — число положительных степеней.

Целевая функция графа (см. рис. 1) имеет вид

$$Z_1(\mathbf{m}) = \left( \sum_{i=1}^{n+d+k+1} g(m_i, m_{i+1}) - \sum_{i=0}^{n+k} a_i s^{i-k} \right)^2 \geq 0, \quad (9)$$

где  $n+k+d+1$  — число ребер (каждое кратное ребро считается за одно);

$d$  — число ребер, кратность которых больше единицы;

$a_i \cdot s^i$  — веса ребер.

Для графа **v8e16** (рис. 1) получим  $d=2, n+k+1=14$ , все  $a_i$  равны единице, кроме  $a_6$  и  $a_{-1}=2$ .

Функция  $g(x,y)$  имеет структуру композиции трех функций:

$$g(x, y) = u(q(f(x, y))).$$

Внутренняя функция  $t = f(x, y) = 2xy - 3(x + y) + 11$ , разделяет множества разрешенных  $S$  и запрещенных ребер  $P$ . Функция  $v = q(t)$  задается соответствием

$$q: \begin{matrix} t \\ v \end{matrix} \left( \begin{matrix} 2 & 4 & 6 & 8 & 9 & 10 & 17 & 26 & 29 & 34 & 45 & 52 & 56 & 78 & P \\ -8 & -7 & -6 & -5 & -4 & -3 & -2 & -1 & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & \text{inf} \end{matrix} \right). \quad (10)$$

В отображении (10) всем элементам множества  $P$  ставится в соответствие  $\text{inf}$  (символ  $\text{inf}$  обозначает очень большое число). Внешняя функция задается формулой:  $u(v) = a_v \cdot s^v$ .

Следует отметить, что суперпозиция функций  $u(q(t))$  может быть заменена одним интерполяционным многочленом на множестве  $S \cup P$ .

При значениях всех  $a_i = 1$  или  $2$  и  $s = 3$  имеем согласно (9)

$$\begin{aligned} A &= \sum_{i=0}^{n+k} a_i s^{i-k} = 111111, 21111211_3 = 3^5 + 3^4 + 3^3 + 3^2 + \\ &+ 3^1 + 3^0 + 2 \cdot 3^{-1} + 3^{-2} + 3^{-3} + 3^{-4} + 3^{-5} + 2 \cdot 3^{-6} + 3^{-7} + \\ &+ 3^{-8} \approx 364,835_{10}. \end{aligned}$$

Это относительно небольшое число для графа с 16 ребрами можно считать «дробным 3-ическим кодом» графа **v8e16**. Если все показатели простых чисел в формуле (9) положительные, то имеем целый 3-ический код:

$$\begin{aligned} A &= 11111121111211_3 = 3^0 + 3^1 + 2 \cdot 3^2 + 3^3 + 3^4 + 3^5 + \\ &+ 3^6 + 2 \cdot 3^7 + 3^8 + 3^9 + 3^{10} + 3^{11} + 3^{12} + 3^{13} = 2393680_{10}. \end{aligned}$$

Для графов большой размерности целое 3-ическое число  $A$  может выйти за границу обрабатываемых ЭВМ чисел. В математических пакетах этими числами являются:  $\alpha = 2,2250738585072 \cdot 10^{-308}$  и  $\omega = 1,7976931348623 \cdot 10^{+308}$ . Меньшая граница  $\alpha$  позволяет присваивать веса  $2^{-v}$  ребрам графа без кратных ребер до значений  $v \leq (-\ln 2, 2250738585072 + 308 \cdot \ln 10) / \ln 2 = 1022$ , то есть  $v \leq 1022$ .

Верхняя граница  $\omega$  позволяет присваивать веса  $2^v$ ,  $v \leq (\ln 1, 7976931348623 + 308 \cdot \ln 10) / \ln 2 - 1 = 1023$  ребрам графа до  $v \leq 1023$ . Таким образом, дробные  $s$ -ические функции можно строить в математических программных пакетах для Эйлеровых графов с числом ребер не более  $1023 + 1022 + 2 = 2047$ . Здесь цифра 2 прибавляется для случая весов ребер  $s^0 = 1$  и  $s^{-\text{inf}} = 0$ .

Опираясь на теорему об однозначности канонической записи  $p$ -адического числа в виде суммы слагаемых в поле  $\mathbb{Q}_p$

$$z = p^{-m} (a_0 + a_1 p^1 + a_2 p^2 + \dots + a_n p^n + \dots), \quad (11)$$

где  $p$  — простое число;

$a_i$  — целое число из диапазона  $0 \leq a_i < p, m \geq 0$ , можно кодировать ребра графа конечной и бесконечной мощности.

Пользуясь однозначностью разложения рационального числа на простые множители (основная теорема арифметики) первое слагаемое ЦФ можно записать мультипликативно

$$Z_1(\mathbf{m}) = \left( \prod_{i=1}^n r(h(f(m_i, m_{i+1}))) - \prod_{i=1}^{n-d} p_i^{\alpha_i} \right)^2, \quad (12)$$

где  $f(m_i, m_{i+1})$  — разделяющая функция;

$h(t)$  — функция, задаваемая соответствием

$$h: \begin{matrix} t \\ w \end{matrix} \left( \begin{matrix} 2 & 4 & 6 & 8 & 9 & 10 & 17 & 26 & 29 & 34 & 45 & 52 & 56 & 78 & P \\ p_1 & p_2 & p_3 & p_4 & p_5 & p_6 & p_7 & p_8 & p_9 & p_{10} & p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & p_{16} \end{matrix} \right);$$

$$r(w) = p_i^{\alpha_i};$$

$p_i$  — различные простые числа;

$\alpha_i$  — целые числа, учитывающие кратность ребер графа.

Следует отметить, что суперпозиция функций  $r(h(t))$  может быть заменена одним интерполяционным многочленом на множестве  $S \cup P$ .

Для графа **v8e16** число  $M = \prod_{i=1}^n p_i^{\alpha_i}$  можно считать « $r$ -мультипликативным кодом». Здесь  $\alpha_i = +1$  или  $-1$  для не кратных ребер и  $\alpha_i = +k_i$  или  $-k_i$  — для кратных. Например, с учетом кратности ребер (1,6) и (3,8) графа **v8e16** имеем



$$M = 2 \cdot 3^{-1} \cdot 5^2 \cdot 7^{-1} \cdot 11 \cdot 13^{-1} \cdot 17 \cdot 19^{-2} \cdot 23 \cdot 29^{-1} \times \\ \times 31 \cdot 37^{-1} \cdot 41 \cdot 43^{-1} = 0,06011.$$

Здесь величина  $M$  принята рациональной. Если считать все степени простых чисел положительными, то  $M$  является целым числом

$$M = 2 \cdot 3 \cdot 5^2 \cdot 7 \cdot 11 \cdot 13 \cdot 17 \cdot 19^2 \cdot 23 \cdot 29 \cdot 31 \cdot 37 \cdot 41 \cdot 43 = \\ = 1,242862326508652850 \cdot 10^{18}.$$

Аналогично в наборах  $\mathbf{m} = (m_i)$  могут быть пары-ребра  $(m_i, m_i + 1)$ , не принадлежащие графу, но которые сгенерированные ГА, тогда им ставится штрафное значение равное простому числу  $p_{16}$ , которое превосходит все  $p_i$  в функции  $w = h(t)$ , например, 53 для графа **v8e16**.

Для дробных  $p$ -мультипликативных ЦФ число ребер графа для их кодирования будет значительно больше, так как в выражении (12) для числа  $M$  можно выбрать два простых наибольших числа  $p < q \leq \omega = 1,7976931348623 \cdot 10^{+308}$  и присвоить двум ребрам графа веса  $p$  и  $q^{-1}$ . Затем взять следующие два простых числа  $p_0 < q_0$  такие, что  $p_0 < q_0 < p$  и присвоить веса  $p_0$  и  $q_0^{-1}$  следующим двум ребрам графа и так далее до простых чисел 2 и 3.

Из теоремы П. Л. Чебышева до границы  $\omega$  приблизительно расположены  $\pi(\omega) = \omega / \ln \omega = 2,5327372760801 \cdot 10^{+305}$  простых чисел. Следовательно, для графа  $p$ -мультипликативная ЦФ теоретически может быть построена с числом ребер не превосходящим  $\pi(\omega)$ .

При опросе ЦФ ГА дробные  $s$ -ическая,  $p$ -адическая и  $p$ -мультипликативная функции графа позволяют уменьшить вычислительные затраты компьютера и избежать выхода за границы самых малых и самых больших чисел в ЭВМ.

Построение целой и дробной  $s$ -ической (9),  $p$ -мультипликативной (12) функции графа имеет важный теоретический смысл, так как устанавливает связь с теорией чисел, и они имеют самый простой программный код.

Способ построения для Эйлеровых графов  $s$ -ических и  $p$ -мультипликативных функций является неоднозначным и зависит от правила кодирования ребер графа составными или простыми числами.

### Результаты моделирования

Применяя генетический алгоритм для вычисления оптимальных замкнутых маршрутов с помощью минимизации дробной  $s$ -ической функции (9) при условиях 'Generations', 40, 'PopulationSize', 475, 'StallGenLimit', 20, 'Vectorized', 'on' и циклическом изменении фактора кроссовера из диапазона от 0,2 до 0,8 с шагом 0,2 с 3-ическим кодом графа **v8e16**

$$A = 3^{-8} + 3^{-7} + 2 \cdot 3^{-6} + 3^{-5} + 3^{-4} + 3^{-3} + 3^{-2} + \\ + 2 \cdot 3^{-1} + 3^0 + 3^1 + 3^2 + 3^3 + 3^4 + 3^5 = 364,4999,$$

получим четыре оптимальных маршрута (табл. 2).

Таблица 2

Результаты расчета маршрутов с помощью 3-ической целевой функции

№	Маршруты
1	(1, 6, 4, 1, 2, 4, 7, 5, 3, 8, 5, 2, 3, 8, 7, 6, 1)
2	(1, 2, 5, 8, 3, 8, 7, 6, 4, 7, 5, 3, 2, 4, 1, 6, 1)
3	(1, 2, 5, 8, 3, 5, 7, 8, 3, 2, 4, 6, 1, 6, 7, 4, 1)
4	(1, 6, 4, 2, 1, 6, 7, 5, 3, 8, 5, 2, 3, 8, 7, 4, 1)

Время вычисления четырех маршрутов на компьютере с частотой 3,4 ГГц равно 12,8 с. Время расчета одного маршрута составляет 3,2 с. Все это достигается простым кодом функции (9) и показывает высокую эффективность генетического алгоритма. Моделирование подтверждает, что дробная  $s$ -ическая функция (9) может быть использована в качестве ЦФ графа без дополнительных слагаемых, и является критериальной функцией для задачи оптимизации нахождения ОЗМ, сводя ее к безусловному экстремуму.

Результаты сходимости приведены на рис. 5, на котором показаны графики перемещения номеров вершин ОЗМ из табл. 2 по столбцам при изменении фактора кроссовера.

Используя для вычисления ОЗМ дробную  $p$ -мультипликативную функцию (11) с дробным  $p$ -мультипликативным кодом графа **v8e16**

$$M = 2 \cdot 3^{-1} \cdot 5^2 \cdot 7^{-1} \cdot 11 \cdot 13^{-1} \cdot 17 \cdot 19^{-2} \cdot 23 \cdot 29^{-1} \times \\ \times 31 \cdot 37^{-1} \cdot 41 \cdot 43^{-1} = 0,0601,$$

и ГА при условиях: 'Generations', 30, 'PopulationSize', 2000, 'StallGenLimit', 80, 'Vectorized', 'on' с циклическим

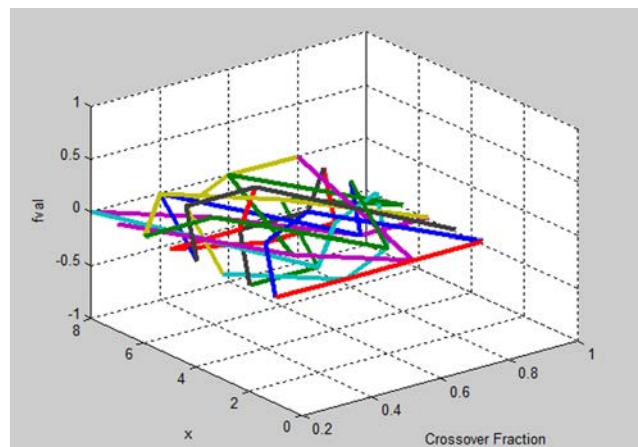


Рис. 5. Перемещение номеров вершин графа в зависимости от кроссовера

изменением фактора кроссовера из диапазона от 0,2 до 0,8 с шагом 0,2, получим 4 ОЗМ (табл. 3).

Таблица 3

Результаты расчета маршрутов с помощью дробной  $p$ -мультипликативной функции

№	Маршруты
1	(1, 4, 2, 3, 8, 5, 7, 8, 3, 5, 2, 1, 6, 4, 7, 6, 1)
2	(1, 6, 7, 4, 6, 1, 4, 2, 3, 8, 7, 5, 3, 8, 5, 2, 1)
3	(1, 6, 1, 4, 7, 6, 4, 2, 3, 8, 7, 5, 3, 8, 5, 2, 1)
4	(1, 4, 7, 8, 3, 2, 4, 6, 7, 5, 8, 3, 5, 2, 1, 6, 1)

Время вычисления 4 ОЗМ на компьютере с частотой 3,4 ГГц равно 118,28 с. Время расчета одного маршрута приблизительно 29,6 с.

Время, затрачиваемое на сходимость генетического алгоритма при подсчете оптимальных замкнутых маршрутов с помощью дробной  $p$ -мультипликативной функции, из-за сложной структуры, на порядок больше, чем для 3-ической целевой функции. Числовое моделирование подтверждает, что дробная  $p$ -мультипликативная функция (12) может быть использована в качестве целевой функции графа без дополнительных слагаемых для расчета оптимальных замкнутых маршрутов в оптимизационной задаче, сводя ее к безусловному экстремуму. Преимущество дробной функции (12) по отношению к целой  $p$ -мультипликативной состоит в том, что ее  $p$ -мультипликативный код, позволяет подобрать такие коды ребер графа, которые дают произведение, не превосходящее заранее заданного числа.

Результаты сходимости для дробной  $p$ -мультипликативной функции графа **v8e16** представлены на рис. 6, на котором показано перемещение номеров вершин по координатам столбца из табл. 3.

Значениями ЦФ (12) являются дробные рациональные числа и поэтому ГА при вычислении ОЗМ сходится до значений:

$$10^{-17} \cdot (0,69; 0,69; 0,69; 0).$$

Эти значения можно считать неточностью машинного округления и принять за 0.

Результаты сходимости в зависимости от фактора кроссовера отражены на рис. 7.

Числовое моделирование сходимости генетического алгоритма подтверждает, что целая и дробная  $s$ -ическая ( $p$ -адическая) (9) и  $p$ -мультипликативная функция (12) могут быть использованы в качестве ЦФ графа без дополнительных слагаемых.

Возможность достаточно оперативного подсчета нескольких различных маршрутов на графе реперных точек генетическим алгоритмом позволяет проводить планирование совместных полетов группы БПЛА без встречи одновременно в вершинах и на ребрах [15], делает возможным эффективное машинное обучение при выборе маршрутов [16], облегчает навигацию [17] в роевом применении [18] и может являться основой для применения БПЛА различного назначения [19–24].

Замечание. Число 16 в функции (2) не может являться ни целым « $s$ -ическим», ни « $p$ -мультипликативным кодом» для графа **v8e16**. Действительно, из равенства  $A = 2393680_{10}$  следует, что минимальный целый 3-ический код намного больше 16.

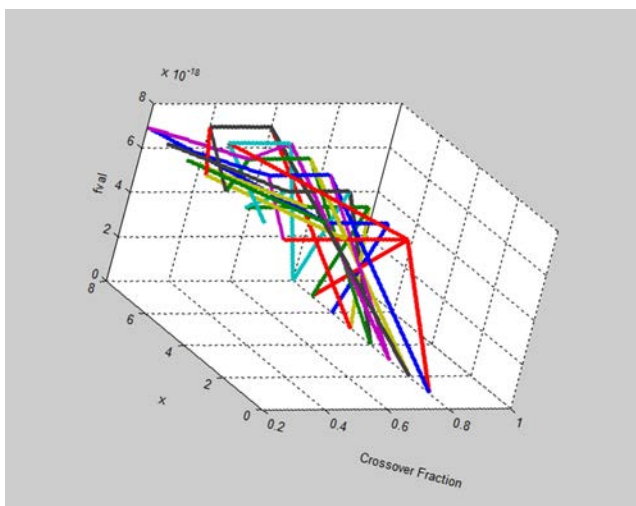


Рис. 6. Перемещение номеров вершин в маршрутах по столбцам в зависимости от изменения фактора кроссовера

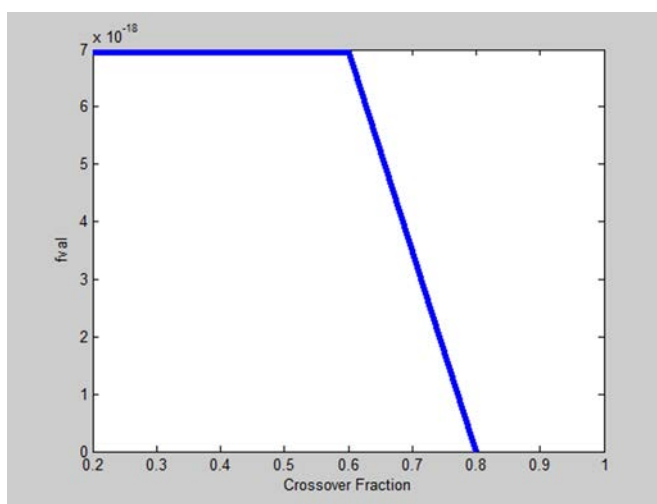
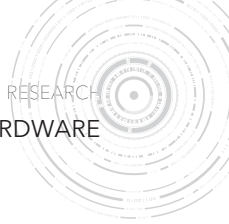


Рис. 7. Результаты сходимости ГА дробной  $p$ -мультипликативной функции в зависимости от изменения фактора кроссовера



Тем более число 16 не может быть и целым минимальным  $p$ -мультипликативным кодом, который равен  $M = 1,242862326508652850 \cdot 10^{18}$ .

Целые  $s$ -ические ( $p$ -адические) и  $p$ -мультипликативные коды  $A$  и  $M$  графа представляют собой дискретные значения и образуют бесконечно возрастающие числовые последовательности без точек сгущения.

Теоретико-числовые ЦФ графа показывают, что принцип кодирования ребер может быть перенесен на кодирование и вершин графа при решении задач с приоритетом информации о вершинах, например, в задаче о раскраске вершин и т.д.

$A$ - и  $M$ -коды являются двойственными подходами к представлению информации о графе в виде суммы линейно-независимых слагаемых или в виде алгебраически независимых множителей. Известно, что сумма преобразуется в произведение с помощью функции  $y = e^x$  и, наоборот, произведение переводится в сумму с помощью функции  $\ln y = x$ . Экспонента и логарифм практически всегда имеют трансцендентные значения. Это приводит к возможности кодирования ребра и вершины трансцендентными функциями.

Трансцендентные ЦФ позволяют кодировать ребра и вершины графа не числовой, а функциональной информацией, которая может быть расшифрована как описание процесса, который протекает при прохождении данного ребра или вершины.

Подобная ситуация функциональных ребер и вершин наблюдается, например, в графах нейронных искусственных сетей, на ребрах которых происходит линейное функциональное преобразование информации, а в вершинах нелинейное преобразование функциями активации.

Обоснование и построение трансцендентных целевых функций графа является предметом дальнейших исследований.

На основе проведенных исследований и полученных результатов можно сформулировать:

**Теорема 1.** Теоретико-числовая целевая функция (9) или (12) для нахождения замкнутых маршрутов на графе имеет такой  $s$ -ический код  $A$ , который однозначно представляется в виде суммы весов ребер или имеет такой  $p$ -мультипликативный код  $M$ , который однозначно представляется в виде произведения весов ребер. Коды  $A$  и  $M$  одного и того же графа при различной кодировке его ребер представляют собой дискретные значения и образуют числовые последовательности.

**Теорема 2.** Теоретико-числовая целевая функция для нахождения замкнутых маршрутов графа является многочленом от нескольких переменных равного сумме или произведению суперпозиций разделяющего многочлена  $t = f(x, y)$  и интерполяционного многочлена  $w = I(t)$  минус  $s$ -ический код или минус  $p$ -мультипликативный код весов

ребер графа. Число слагаемых или произведений равно числу ребер графа. Число переменных в целевой функции равно числу ребер графа плюс один  $n + 1$ .

### Заключение

В результате проведенных исследований можно отметить следующее:

- генетический алгоритм формирует метод решения задачи маршрутизации, который приводит к методике построения теоретико-числовых целевых функций на графах в виде  $s$ -ической,  $p$ -адической или  $p$ -мультипликативной функции для нахождения замкнутых маршрутов;

- теоретико-числовые целевые функции графа основаны на теоремах теории чисел: однозначного представления чисел в  $s$ -ической системе счисления,  $p$ -адических чисел в канонической форме и основной теореме арифметики об однозначности разложения целого числа в произведение степеней простых чисел;

- для нахождения оптимальных замкнутых маршрутов на Эйлеровом графе строится  $s$ -ическая,  $p$ -адическая или  $p$ -мультипликативная ЦФ, которая определяется, согласно теоремы 1, имеет вид, описанный в теореме 2 и задается неоднозначно с точностью до способа кодирования ребер;

- $s$ -ические,  $p$ -адические и  $p$ -мультипликативные функции наследуют и усиливают свойства всех слагаемых алгебраических целевых функций (1)-(6) и обнуляются только на оптимальных замкнутых маршрутах Эйлеровой модели самого графа;

- $s$ -ические,  $p$ -адические и  $p$ -мультипликативные функции графа обеспечивают применение генетического алгоритма для решения задачи маршрутизации на графе, объединяя в себе все слагаемые алгебраической целевой функции (1);

- дробные  $s$ -ические,  $p$ -адические и дробные  $p$ -мультипликативные функции графа позволяют строить целевые функции для сверхбольших графов с конечным или бесконечным числом ребер и вершин;

- $s$ -ические,  $p$ -адические и  $p$ -мультипликативные функции графа устанавливают тесную связь с теорией чисел и распределением простых чисел;

- $s$ -ические,  $p$ -адические и  $p$ -мультипликативные целевые функции совместно с генетическим алгоритмом с особями-перестановками позволяют в значительной мере разрешить противоречие между сложностью и оперативностью в задаче маршрутизации и повысить вычислительную эффективность;

- дальнейшее разрешение противоречия может быть выполнено на основе поиска новых методов построения целевых функций, например, трансцендентных, и функционирования генетического алгоритма;

- генетический алгоритм позволяет с помощью  $s$ -ических,  $p$ -адических и  $p$ -мультипликативных целевых

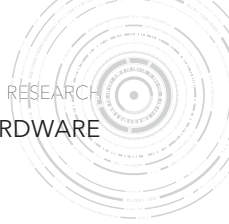
функций, рассчитывать маршруты в режиме реального времени на борту БПЛА или заблаговременно при предполетной подготовке.

– целевые функции и генетический алгоритм могут быть использованы в программных алгоритмах планирования оптимальных маршрутов по реперным точкам на местности в одиночном и групповом полете БПЛА для повышения автономности и автоматизации процессов управления.

#### Литература

1. Подпьян П.Е., Максимов Н.А. Многофазный алгоритм решения задачи планирования полета группы беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2011. № 43. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=24769> (дата обращения 14.06.2019).
2. Zadeh S.M., Powers D., Sammut K., Lammas A., Yazdani A.M. Optimal Route Planning with Prioritized Task Scheduling for AUV Missions // Proceedings of the IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (Langkawi, Malaysia, 18–20 October 2015). URL: <https://arxiv.org/abs/1604.03303> (дата обращения 17.06.2019).
3. He P., Dai S. Stealth Real-time Paths Planning for Heterogeneous UAV Formation Based on Parallel Niche Genetic Algorithm // Journal of Computational Information Systems. 2014. No. 10(15). Pp. 6731–6740.
4. Халимов Н.Р., Анищенко А.И. Особенности программно-алгоритмического обеспечения решения задачи целеразделения истребителей в АСУ // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2016. Т. 8. № 3. С. 5–11.
5. Тань Лиго, Фомичев А.В. Планирование пространственного маршрута полета беспилотного летательного аппарата с использованием методов частично целочисленного линейного программирования // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2016. № 2. С. 53–66. DOI: 10.18698/0236-3933-2016-2-53-66
6. Аллилуева Н.В., Руденко Э.М. Задача маршрутизации беспилотных летательных аппаратов на графе реперных точек // I-methods. 2018. Т. 10. № 1. С. 5–18.
7. Зенкевич С.Л., Болотин Е.И. О планировании в мультиагентных системах, использующих методы искусственного интеллекта // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 11. С. 21–27.
8. Аллилуева Н.В., Руденко Э.М. Математический метод расчета целевой функции на графах и решение задачи маршрутизации // Труды МАИ. 2017. № 96. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=85773> (дата обращения 28.06.2019).
9. Аллилуева Н.В. Интеллектуальная система БПЛА противодействия несанкционированному вторжению на охраняемую территорию // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 1. С. 47–54.
10. Михайлин Д.А., Аллилуева Н.В., Руденко Э.М. Сравнительный анализ эффективности генетических алгоритмов маршрутизации полета с учетом их различной вычислительной трудоемкости и многокритериальности решаемых задач // Труды МАИ. 2018. № 98. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=90386> (дата обращения 30.06.2019).
11. Аллилуева Н.В., Дараган А.Д., Ефремов А.А., Руденко Э.М., Семикина Е.В. Применение оптимальных замкнутых маршрутов для маршрутизации группового полета БПЛА при изменении геометрии графа реперных точек на местности // Научно-технический сборник. Серпухов: Филиал ВА РВСН имени Петра Великого. 2018. Ч. 1. С. 91–95.
12. Kim J.W., Kim S.K. Fitness switching genetic algorithm for solving combinatorial optimization problems with rare feasible solutions // The Journal of Supercomputing. 2016. Vol. 72. Issue 9. Pp. 3549–3571.
13. Wagner M., Neumann F. Single- and Multi-Objective Genetic Programming: New Runtime Results for SORTING // Proceedings of the 2014 IEEE Congress on Evolutionary Computation, Beijing, China, 6–11 July 2014. Pp. 125–133.
14. Гравченко Ю.А., Гранкин Б.К., Кукушкин И.О., Мокан Д.О. Кодирование графов для решения задач распределения и преобразования потоков // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2015. Вып. 649. С. 23–28.
15. Kothari M., Postlethwaite I., Gu D. Multi-UAV path planning in obstacle rich environments using rapidly-exploring random trees // Proc. of the combined 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference Shanghai, P.R. China, December 16–18, 2009. Pp. 3069–3074.
16. Bai A., Russell S. Efficient Reinforcement Learning with Hierarchies of Machines by Leveraging Internal Transitions // Proceedings of the Twenty-Sixth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-17) (Melbourne, Australia 19–25 August 2017). URL: <https://www.ijcai.org/proceedings/2017/0196.pdf> (дата обращения 18.03.2019).
17. Яковлев К.С., Хитыков В.В., Логинов М.И., Петров А.В. Система навигации группы БПЛА на основе маркеров // Робототехника и техническая кибернетика. 2014. № 4(5). С. 44–48.
18. Dorigo M., Floreano D., Gambardella L.M., Mondada F. et al. Swarmanoid: A Novel Concept for the Study of Heterogeneous Robotic Swarms // IEEE Robotics & Automation Magazine. 2013. Vol. 20. Issue 4. Pp 60–71.
19. Sa I., Corke P. Vertical Infrastructure Inspection Using a Quadcopter and Shared Autonomy Control // Field and Service Robotics. 2014. Pp. 219–232.
20. Merwaday A., Tuncer A., Kumbhar A., Guvenc I. Improved throughput coverage in natural disasters: Unmanned aerial base stations for public-safety communications // IEEE Veh. Technol. Mag. 2016. Vol. 11. No. 4. Pp. 53–60.
21. Zeng Y., Zhang R., Lim T.J. Throughput maximization for UAV-enabled mobile relaying systems // IEEE Trans. Commun. 2016. Vol. 64. No. 12. Pp. 4983–4996.
22. Chen J., Gesbert D. Optimal positioning of flying relays for wireless networks: A LOS map approach // Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC) (Paris, France, May 21–25, 2017). IEEE, 2017. Pp. 1–6.
23. Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Debbah M. Mobile unmanned aerial vehicles UAVs for energy-efficient internet of things communications // IEEE Trans. Wireless Commun. 2017. Vol. 16. No. 11. Pp. 7574–7589.
24. Wu Q., Zeng Y., Zhang R. Joint trajectory and communication design for multi-UAV enabled wireless networks // IEEE Trans. Wireless Commun. 2018. Vol. 17. No. 3. Pp. 2109–2121.





## ROUTING ON A GRAPH OF NUMBER-THEORETIC OBJECTIVE FUNCTION AND GENETIC ALGORITHM

**NATALIA V. ALLILUYEVA,**

St. Petersburg, Russia, allilueva\_nv@radar-mms.com

**EDUARD M. RUDENKO,**

Serpukhov, Russia, eduard5529@yandex.ru

**ELENA V. SEMIKINA,**

Serpukhov, Russia, labinfo\_serp@inbox.ru

**KEYWORDS:** routing; graphs; target functions; genetic algorithm; mathematic model.

### ABSTRACT

It is considered the mathematical approach to calculation of routes of unmanned vehicles on the Euler graph of reference points on the ground. The methods for constructing of the objective function of the graph based on algebraic and number-theoretic approach are compared. The objective graph function as a polynomial of several variables reaches minimal zero value on the sets of vertices of the graph which are the closed routes on the graph. Algebraic approach leads to the objective function as a sum of several polynomials. The first augend takes into account the information about permanence of the minimum length of closed route of Euler graph passing through all edges once. The other augends represent the combinatorial frequency of the vertices of Euler graph in the optimal closed routes of minimal length which is equal to a half of their multiplicity. Analysis of an algebraic objective function as a sum of polynomials shows possibility of finding of closed routes on various Euler models of this graph on the example of the specific graph. Number-theoretical approach leads to construction of the objective function as a polynomial. The theoretical basis for construction of the objective function in this approach are theorems of uniqueness of the representation of integers as a sum in the  $s$ -number system and on the uniqueness of a rational number as an irreducible ratio of product of powers of different primes. The mathematical model of route calculation on the graph is based on minimization of  $s$ - and  $p$ -multiplicative objective functions of the graph made by genetic algorithm. The effectiveness of the routes calculation has been studied using by means of the constructed objective functions of the graph. Minimal required time is achieved by route calculation using the whole  $s$ -objective function. Number-theoretical approach makes it possible to construct the objective functions for extra-large graphs and points to the connection with the distribution of primes and the theory of  $p$ -adic numbers. All constructed number-theoretical objective functions have the specific-

ity of achieving the minimum which is equal to zero only on optimal closed routes of the minimal length graph. The interconnection of the applied problem of unmanned aerial vehicles routing on the ground with the mathematical problem of optimization on the graphs by means of number theory and genetic algorithm is shown.

### REFERENCES

1. Podlipyan P.E., Maximov N.A. Multi-phase algorithm for solving the problem of planning the flight of unmanned aerial vehicles. *Trudy MAI* [Proceedings Moscow Aviation Institute]. 2011. No. 43. Pp. 1-16. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=24769> (date of access 14.06.2019). (In Russian)
2. Zadeh S.M., Powers D., Sammut K. Optimal Route Planning with Prioritized Task Scheduling for AUV Missions Article. *Proceedings of the IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (Langkawi, Malaysia, 18-20 October 2015)*. URL: <https://arxiv.org/abs/1604.03303> (date of access 17.06.2019).
3. He P., Dai S. Stealth Real-time Paths Planning for Heterogeneous UAV Formation Based on Parallel Niche Genetic Algorithm. *Journal of Computational Information Systems*. 2014. No. 10(15). Pp. 6731-6740.
4. Khalimov N.R., Anishenko A.I. Osobennosti programmno-algoritmicheskogo obespechenija reshenija zadachi celeraspredelenija istrebitelej v ASU [Especially software algorithmic support for solving target allocation fighters in automatic control system]. *Trudy VoЕННО-kosmicheskoy akademii imeni A.F. Mozhajskogo* [Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy]. 2016. Vol. 8. No. 3. Pp. 5-11. (In Russian)
5. Tan LiguO, Fomichev A.V. The spatial flight route planning of unmanned aerial vehicles using the methods of mixed-integer linear programming. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*. 2016. No. 2. Pp. 53-66. DOI: 10.18698/0236-3933-2016-2-53-66 (In Russian)





6. Allilueva N.V., Rudenko E.M. The routing problem of unmanned aerial vehicles in a graph of reference points. *I-methods*. 2018. Vol. 10. No. 1. Pp. 5-18. (In Russian)
7. Zenkevich S.L., Bolotin E.I. Planning in Multiagent Systems that Use Artificial Intelligence Methods. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2014. No. 11. Pp. 21-27. (In Russian)
8. Allilueva N.V., Rudenko E.M. Mathematical method of objective function calculation and routing problems solving. *Trudy MAI* [Proceedings Moscow Aviation Institute]. 2017. No. 96. <http://trudymai.ru/published.php?ID=85773> (date of access 28.06.2019). (In Russian)
9. Allilueva N.V. UAV intellectual system for counteraction against unauthorized intrusion into the protected territory. *Issues of radio electronics*. 2018. No.1. Pp. 47-54. (In Russian)
10. Mihajlin D.A., Allilueva N.V., Rudenko E.M. Comparative analysis of the effectiveness of genetic algorithms the routing of the flight, taking into account their different computational complexity and multicriteria tasks. *Trudy MAI* [Proceedings Moscow Aviation Institute]. 2018. No. 98. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=90386> (date of access 30.06.2019). (In Russian)
11. Allilueva N.V., Daragan A.D., Efremov A.A., Rudenko E.M., Semikina E.V. Primenenie optimal'nyh zamknutyh marshrutov dlya marshrutizatsii gruppovogo poleta BPLA pri izmenenii geometrii grafa repernyh toчек na mestnosti [Application of optimal closed routes for UAV group flight routing when changing the geometry of the graph of reference points on the ground]. In book *Nauchno-tekhnicheskij sbornik*. Serpuhov: Filial VA RVSN imeni Petra Velikogo Publ., 2018. Pt. 1. Pp. 91-95. (In Russian)
12. Kim J.W., Kim S.K. Fitness switching genetic algorithm for solving combinatorial optimization problems with rare feasible solutions. *The Journal of Supercomputing*. 2016. Vol. 72. Issue 9. Pp. 3549-3571.
13. Wagner M., Neumann F. Single- and Multi-Objective Genetic Programming: New Runtime Results for SORTING. *Proceedings of the 2014 IEEE Congress on Evolutionary Computation*. Beijing, China, 6-11 July 2014. Pp. 125-133.
14. Gravchenko YU.A., Grankin B.K., Kukushkin I.O., Mogan D.O. Kodirovanie grafov dlya resheniya zadach raspredeleniya i preobrazovaniya potokov [Coding of graphs for solving problems of distribution and transformation of flows]. *Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii im. A.F. Mozhajskogo* [Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy]. 2015. Issue 649. Pp.23-28. (In Russian)
15. Kothari M., Postlethwaite I., Gu D. Multi-UAV path planning in obstacle rich environments using rapidly-exploring random trees. *Proc. of the combined 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference*. Shanghai, P.R. China, December 16-18, 2009. Pp. 3069-3074.
16. Bai A., Russell S., Efficient Reinforcement Learning with Hierarchies of Machines by Leveraging Internal Transitions. *Proceedings of the Twenty-Sixth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-17), Melbourne, Australia 19-25 August 2017*. URL: <https://www.ijcai.org/proceedings/2017/0196.pdf> (date of access 18.03.2019)
17. Yakovlev K.S., Khitkov V.V., Loginov M.I., Petrov A.V. Navigation system based on markers for UAV group. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Purposes and objectives of journal]. 2014. No. 4(5). Pp. 44-48. (In Russian)
18. Dorigo M., Floreano D., Gambardella L.M., Mondada F. et al. Swarmanoid: A Novel Concept for the Study of Heterogeneous Robotic Swarms. *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 2013. Vol. 20. Issue 4. Pp 60-71.
19. Sa I., Corke P. Vertical Infrastructure Inspection Using a Quadcopter and Shared Autonomy Control. *Field and Service Robotics*. 2014. Pp. 219-232.
20. Merwaday A., Tuncer A., Kumbhar A., Guvenc I. Improved throughput coverage in natural disasters: Unmanned aerial base stations for public-safety communications. *IEEE Veh. Technol. Mag.* 2016. Vol. 11. No. 4. Pp. 53-60.
21. Zeng Y., Zhang R., Lim T.J. Throughput maximization for UAV-enabled mobile relaying systems. *IEEE Trans. Commun.* 2016. Vol. 64. No. 12. Pp. 4983-4996.
22. Chen J., Gesbert D. Optimal positioning of flying relays for wireless networks: A LOS map approach. *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC), Paris, France, May 21-25, 2017*. IEEE, 2017. Pp. 1-6.
23. Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Debbah M. Mobile unmanned aerial vehicles UAVs for energy-efficient internet of things communications. *IEEE Trans. Wireless Commun.* 2017. Vol. 16. No. 11. Pp. 7574-7589.
24. Wu Q., Zeng Y., Zhang R. Joint trajectory and communication design for multi-UAV enabled wireless networks. *IEEE Trans. Wireless Commun.* 2018. Vol. 17. No. 3. Pp. 2109-2121.

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Alliluyeva N.V., Leading specialist of Joint stock company "Scientific-production enterprise "Radar MMS";  
Rudenko E.M., PhD, associate professor at the Department of Mathematics of Peter the Great Strategic Missile Academy (Serpukhov Branch);  
Semikina E.V., Lecturer at the Department of Mathematics of Peter the Great Strategic Missile Academy (Serpukhov Branch).



doi: 10.24411/2409-5419-2018-10291

# ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ВИДА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МОДЕЛЬНОГО ЗАМКНУТОГО КРЫЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

**НЬЯН**  
**Мин Хтет<sup>1</sup>**

**ВОЛКОВ**  
**Игорь Валентинович<sup>2</sup>**

## АННОТАЦИЯ

*Предмет.* В работе исследовано напряженно-деформированное состояние модельного замкнутого крыла самолета методом экспериментально-расчетного анализа с использованием спекл-голографической интерферометрии. *Цель.* В результате исследования напряженно-деформированного состояния модели крыла раскрыть и наглядно продемонстрировать возможности экспериментально-расчетного анализа с использованием спекл-голографии. *Методология.* Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния конструкций осуществлялось с использованием экспериментального нагрузочного устройства. *Результаты.* Разработан алгоритм экспериментально-расчетного анализа напряженно-деформированного состояния конструкций с использованием спекл-голографии и продемонстрированы результаты исследований на примере экспериментального нагрузочного устройства. *Область применения полученных результатов.* Результаты исследований могут быть использованы для разработки концепции силовой схемы летательного аппарата с замкнутой системой крыльев, которая считается конструктивно одной из наиболее перспективных, так как имеет много потенциальных достоинств, связанных с уменьшением его веса, повышением жесткости конструкции и уменьшением его деформаций, с возможностью непосредственного управления подъемной и боковыми силами. *Выводы.* Одним из наиболее важных аспектов спекл-голографической интерферометрии является качество получаемой спекл-голограммы, от которой во многом зависит ее дифракционная эффективность. При этом улучшение дифракционной эффективности при решении практических задач осуществляется благодаря подбору проявителя фотопластин, установке определенного времени экспозиции и выбору методики обработки фотопластин. Однако на практике нередко возникают проблемы получения максимальной дифракционной эффективности голограмм. Нами производился выбор проявителя, времени экспозиции, а также методики фотообработки спекл-голограмм во встречных пучках в процессе практического эксперимента. *Практическая значимость.* Описанная технология внестендовой регистрации спекл-голограмм может быть использована в процессе исследований напряженно-деформированного состояния натуральных авиаконструкций в зонах концентрации напряжений, а также их выявления во время промышленных натуральных испытаниях.

## Сведения об авторах:

<sup>1</sup>аспирант Московского физико-технического института (национального исследовательского университета), г. Жуковский, Россия, nyanminhtet@gmail.com

<sup>2</sup>к.т.н., старший научный сотрудник Московского физико-технического института (национального исследовательского университета), г. Жуковский, Россия, volkoviv39@mail.ru

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** напряженно-деформированное состояние; экспериментально-расчетный анализ; спекл-голографическая интерферометрия; модельное замкнутое крыло; конструкция летательных аппаратов; экспериментальное нагрузочное устройство.

**Для цитирования:** Няян Мин Хтет, Волков И.В. Исследование напряженно-деформированного состояния и вида напряженного состояния модельного замкнутого крыла с использованием спекл-интерферометрии // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 6. С. 15-21. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10291

### Введение

Экспериментальное исследование НДС с использованием голографической интерферометрии при анализе напряженно-деформированного состояния конструкций имеет некоторые специфические особенности. Прежде всего, это связано с использованием испытательной техники, выполненной в виде экспериментального нагрузочного устройства, стенда или же вида промышленной испытательной машины, на которой закрепляется и подвергается нагружению испытываемая конструкция. Это положение наталкивается на трудности выполнения основного требования голографического процесса — обеспечения стационарности за время экспозиции всех компонент оптической схемы, включая конструкцию. При силовом воздействии на испытываемую конструкцию (чаще это производится электрогидравлическим способом) трудно, а порой невозможно, обеспечить механическую стабильность объекта за время экспозиции, исчисляемое при использовании непрерывных оптических квантовых генераторов секундами и даже минутами. Это осложняется тем, что испытательную машину с конструкцией в большинстве реальных испытаний невозможно разместить на оптической плите, используемой для виброизоляции оптической схемы. Особенно это касается крупногабаритных натуральных конструкций. Такие трудности приводили к тому, что с помощью голографической интерферометрии вплоть до последнего времени натурные конструкции не исследовались.

Работы последних лет [1–8] показали, что трудности исследований натуральных объектов преодолены. При этом регистрирующие оптические схемы при определенных допущениях, имея малые размеры, компактно монтировались на испытываемой конструкции. Основание с регистрирующей оптической схемой жестко прикреплялось к конструкции или к испытательной машине. Причем, существующие вибрации, наводимые посторонними агрегатами, а также возникающие вследствие электрогидравлического действия машины при уменьшении их в разумных пределах позволяли получать с хорошей дифракционной эффективностью дифференциальные интерферограммы. Эта методика основывается на независимости разности хода лучей в оптической схеме, возникающей в эксперименте от допустимых колебаний источника излучения поверхности объекта.

### Содержание

Концепция силовой схемы летательного аппарата (ЛА) с замкнутой системой крыльев считается конструктивно одной из наиболее перспективных. Конструкция самолёта с замкнутым крылом имеет много потенциальных достоинств, связанных с уменьшением его веса, повышением жесткости конструкции и уменьшением его дефор-

маций, с возможностью непосредственного управления подъемной и боковыми силами.

Преобразование ЛА к новой оптимальной рабочей конфигурации, при переходе от взлетно-посадочных режимов к полетным, может быть достигнуто путем разворота двигателей относительно фюзеляжа ЛА, или путем изменения взаимного расположения агрегатов, вплоть до их полного смыкания, изменением углов стреловидности и крутки крыла, изменения длины и крутки лопастей винта и других преобразований [9–14].

На рис. 1 представлена модель самолета с такой конструктивной схемой. Испытание модели проводилось на испытательной машине «Инстрон 10000» со специально разработанной программой испытаний на изгиб по трехточечной схеме рис. 2.

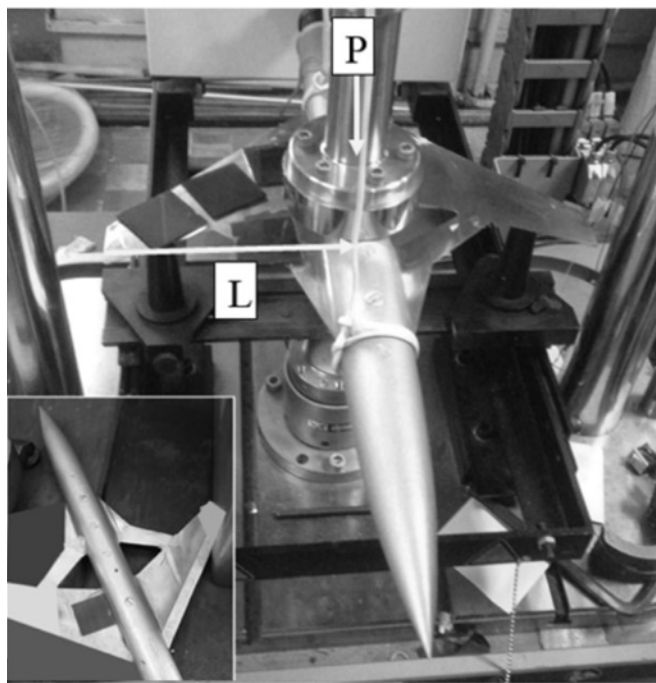


Рис. 1. Установка испытания модели самолет:  
P — нагрузка, L — база изгибающего момента крыла

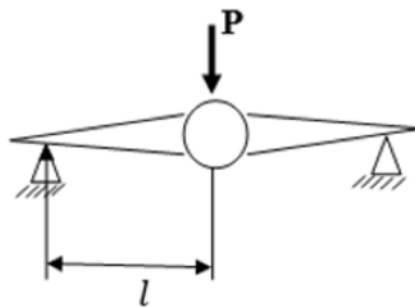
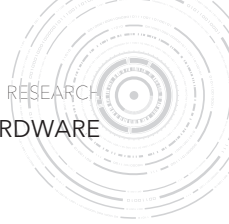


Рис. 2. Схема испытаний модели



### Порядок применения метода для регистрации НДС модельного замкнутого крыла самолета при изгибе

Используемый метод позволяет определить с одинаковой удовлетворительной точностью пространственные компоненты перемещений в одном эксперименте, по единой оптической схеме, на одной голограмме двойной экспозицией. Высокая чувствительность к трем составляющим вектора перемещений на освещаемой поверхности конструкции достигается за счет того, что на одной фотопластинке имеют место две интерференционные картины (спекл-голограммы двойной экспозиции), несущие раздельную информацию о нормальных и касательных перемещениях на поверхности конструкции.

Деформации натурной конструкции самолета имеют все компоненты в пространстве. Поэтому, для регистрации этих компонент использовался метод спекл-голографии во встречных пучках, позволяющий регистрировать все компоненты деформации  $u$ ,  $v$ ,  $w$  на поверхности конструкции [1–6]. Таким образом, этот метод позволяет снимать полную информацию по всем компонентам на модельном крыле.

Рассмотрим примеры использования голографической интерферометрии при исследовании напряженно-деформированного состояния на крыле модели элементов конструкции при изгибе.

Ниже представлен пример регистрации деформаций в лабораторных условиях на испытательной машине «Инстрон 10000» модельного крыла самолета. Для работы на испытательной машине была составлена программа испытаний на изгиб с остановками на этапах нагружения для экспозиции фотопластинок и регистрации дифференциальных спекл-голограмм. В эксперименте мы использовали полупроводниковый лазер для освещения расширенным пучком исследуемого места крыла и высокоразрешающие фотопластинки ПФГ 03М. Для крепления фотопластинок на поверхности образца было разработано приспособление, максимально исключающее паразитное постороннее перемещение ее относительно деформируемой поверхности.

Испытания проводились в следующей последовательности. После установки нагрузки  $P_1$  на первом регистрируемом этапе нагружения устанавливалась фотопластинка на исследуемое место на модельном крыле и производилась первая экспозиция спекл-голограммы. После этого, на следующем этапе нагружения  $P_2$  осуществлялась вторая экспозиция этой спекл-голограммы без изменений в оптической схеме.

Фотохимическая обработка фотопластинок производилась проявителем ГП-3 при времени проявления 5 минут без закрепления с последующей промывкой.

В основе методики расшифровки интерферограмм, предложенной Е. Б. Александровым и А. М. Бонч-

Бруевичем, лежит рассмотрение условий интерференции лучей, исходящих от 2-х тождественных точек поверхности. Пусть  $\vec{\rho}_0$  — орт освещающего пучка,  $\vec{\rho}_n$  — орт направления наблюдения, тогда суммарный сдвиг фаз  $\delta$  при смещении точки в направлении вектора  $\vec{U}$  определится выражением:

$$\delta = n\lambda = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{U} (\vec{\rho}_0 + \vec{\rho}_n),$$

где  $\lambda$  — длина волны используемого излучения,  $n$  — порядковый номер полосы, проходящей через исследуемую точку при наблюдении интерферограммы.

Поэтому каждое наблюдение дает значение проекции вектора перемещения на биссектрису угла между направлениями освещения и наблюдения.

При изменении направления наблюдения полосы сместятся относительно поверхности объекта.

### Результаты расчетно-экспериментального анализа

$$P = 0,31 \text{ кН}, \quad l = 0,16 \text{ м}, \quad y = 0,00255 \text{ м}$$

$$y = \frac{P}{2} \cdot \frac{5l^3}{48EJ}$$

$$EJ = \frac{P}{2} \cdot \frac{5l^3}{48y} = 25,9 \text{ Па} \times \text{м}^2$$

Таким образом, используя балочную теорию изгиба крыла, мы получили интегральную жесткость  $EJ$  крыла по экспериментальным данным прогиба  $y$  относительно фюзеляжа.

На рис. 3 представлено фото поверхностной интерферограммы модельной части крыла при освещении спекл-голограммы во встречных пучках двойной экспозиции.

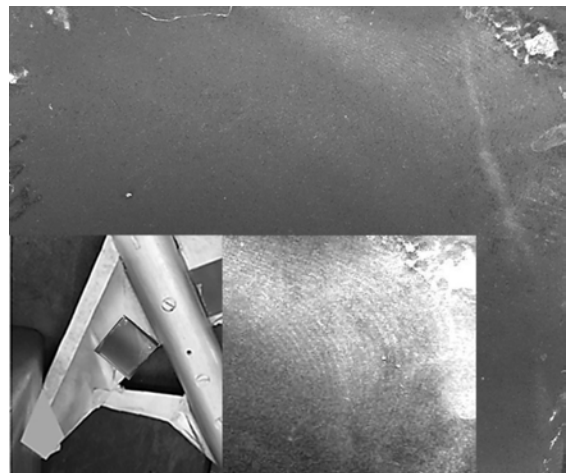


Рис. 3. Спекл-интерферограмма №4-11-01-2019 на крыле у фюзеляжа



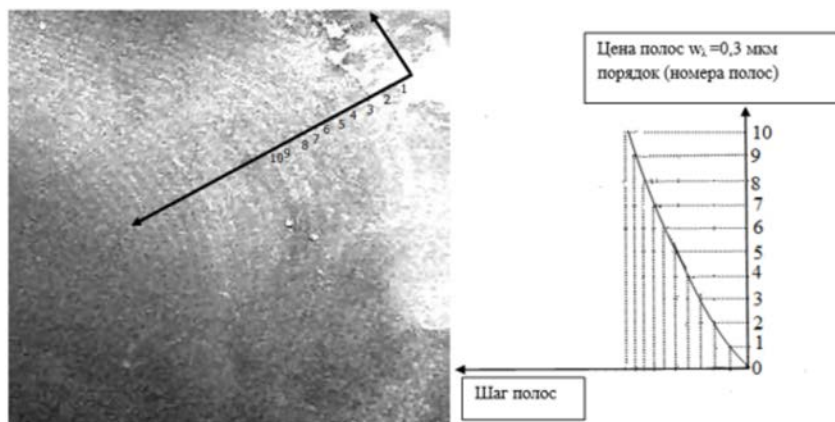


Рис. 4. Интерферограмма и график перемещений  $W$  по стрелке на интерферограмме рис. 3

Легко видеть кривые густые полосы и их центр кривизны, указанный стрелкой, указывающей на центр изгиба.

Напряженно деформированное состояние в теории упругости описывается формулами при плоском изгибе:

$$\sigma_x = E \left[ \frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{h/2}{1-\nu^2} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \right],$$

$$\sigma_y = E \left[ \frac{\partial v_0}{\partial y} + \frac{h/2}{1-\nu^2} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \right],$$

$$\tau_{xy} = G \left[ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} + \frac{h/2}{1+\nu} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) \right],$$

$$M_x = -D \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right),$$

$$M_y = -D \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right),$$

$$M_{xy} = -M_{yx} = D(1-\nu) \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right),$$

$$D = Eh^3 / [12(1-\nu^2)]$$

где  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  — нормальные и касательные напряжения в плоскости;  $u$ ,  $v$ ,  $w$  — пространственные перемещения в плоскости,  $E$ ,  $G$  — упругие константы,  $\nu$  — коэффициент Пуассона,  $D$  — жесткость при изгибе,  $h$  — толщина пластины.

Деформации при изгибе крыла по интерферограмме рис. 4 регистрируются с ценой полос  $w_\lambda = 0,3$  мкм, (на 1 мм = 3 полосы):

$$\epsilon_x^w = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{3 \times 0,3 \text{ мкм}}{1 \times 10^3 \text{ мкм}} = 0,9 \times 10^{-3}$$

Деформации в плоскости элемента крыла по спекл-голограмме № 4-11-01-2019 при фильтрации с ценой полос  $U_\lambda = 1,8$  мкм и шагом  $A$ :

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{U_\lambda}{A} = \frac{1,8 \text{ мкм}}{2,2 \times 10^3 \text{ мкм}} = 0,818 \times 10^{-3}$$

На рис. 5 представлена интерферограмма, полученная со спекл-голограммы № 1-10.01.2019 на крыле в указанной на фото зоне.

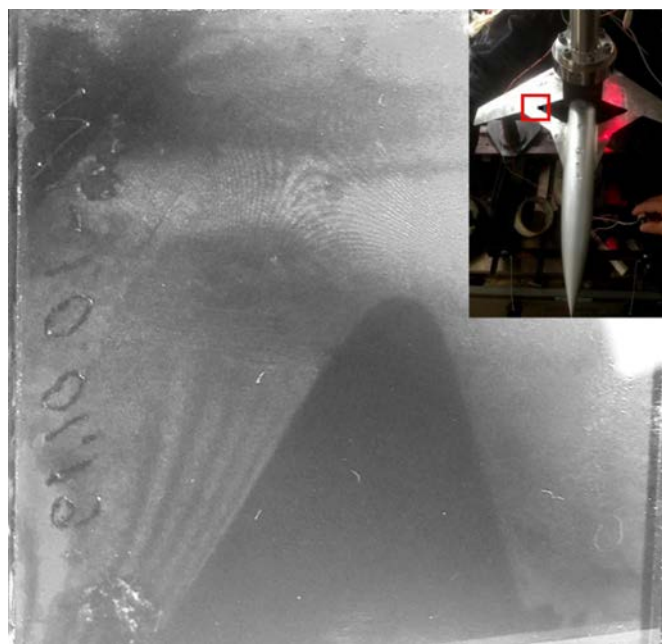


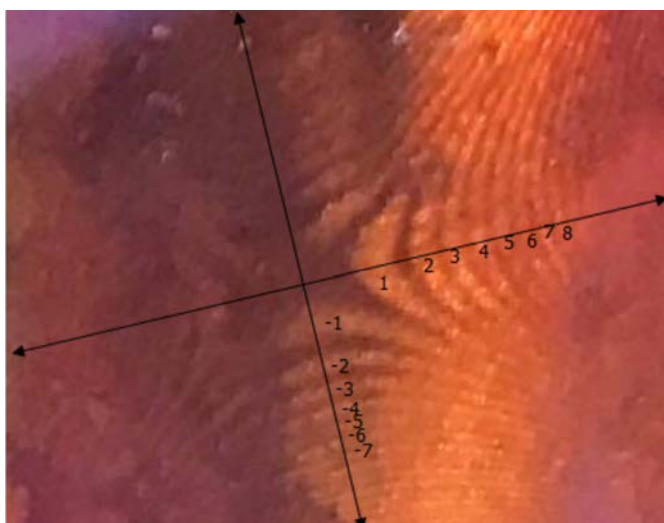
Рис. 5. Спекл-интерферограмма на крыле № 1-10.01.2019 в указанной на фото зоне



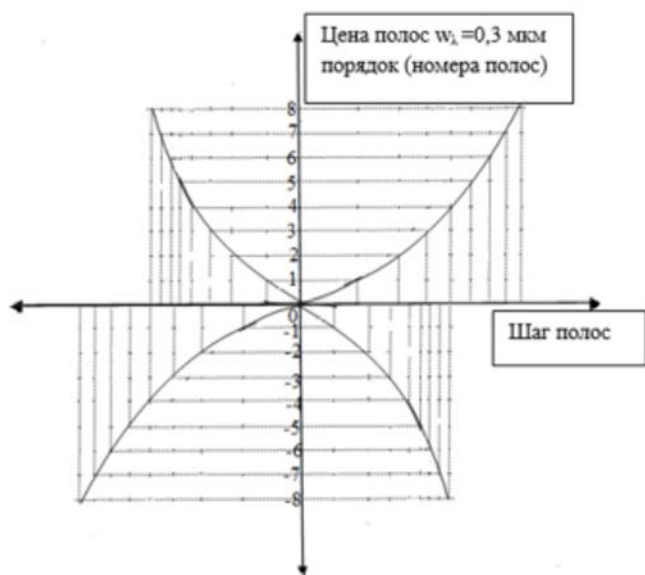


На рис. 6а представлено фото поверхностной интерферограммы на участке подкрепляющего элемента в зоне седловины перегиба (нулевая темная полоса) поверхности модельного замкнутого крыла. На рис. 6б представлены эпюры прогибов в этой зоне.

На рис. 7 представлена интерферограмма № 3–10.01.2019 прогибов в наблюдаемой зоне по спекл-голограмме на крыле.



а)



б)

Рис. 6. Интерферограмма а) и график б) перемещений  $W$  по голограмме № 1-10.01.2019

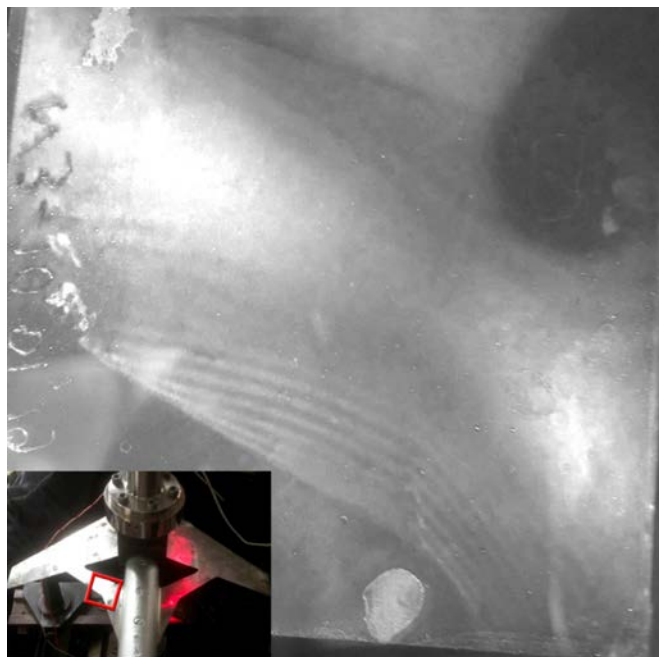


Рис. 7. Спекл-интерферограмма № 3-10.01.2019 на крыле в указанной зоне на фото внизу

### Заключение

Представленный материал исследования НДС модели крыла раскрывает возможности экспериментально-расчетного анализа с использованием спекл-голографии. Используемый метод позволяет определить с одинаковой высокой чувствительностью на микронном уровне пространственные компоненты перемещений и деформаций в отдельных местах натурных авиаконструкций.

### Литература

1. Волков И. В. Измерение поля перемещений и деформаций натурального образца вблизи концентратора напряжений с помощью «Speckle» голографии // Проблемы прочности. 1975. № 9. С. 89–91.
2. Волков И. В. Применение спекл-голографии для измерения компонент деформаций натуральных конструкций // Материалы 7 Всесоюзной школы по голографии (Ростов Великий, 14–23 января 1975). Ленинград: ЛИЯФ, 1975. С. 305–318.
3. Волков И. В. Внестендовая голография. Новые голографические и спекл-интерферометрические методы в экспериментальной механике // Известия ВУЗов. Поволжский регион. Технические науки. 2005. № 5 (20). С. 201–211.
4. Волков И. В. Использование метода спекл-голографии в экспериментальной механике // Измерительная техника. 2017. № 2. С. 42–46.

5. Волков И. В., Вышинский В. В., Кисловский А. О. Теоретические основы метода спекл-голографии в экспериментальной механике // Труды МФТИ. 2017. Т. 9. № 2. С. 13–22.

6. Волков И. В., Ньян Мин Хтет, Вэй Хлэйи У, Тун Мин Лат. Определение физико-механических характеристик материалов при исследовании концентрации напряжений в образцах с отверстиями // Труды МФТИ, 2018. Т. 10. № 1. С. 68–74.

7. Ньян Мин Хтет, Тун Мин Лат, Вэй Хлэйи У, Волков И. В. Расчетно-экспериментальный метод анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) авиаконструкций // Труды МФТИ. 2018. Т. 10. № 4 (40). С. 131–136.

8. Волков И. В. Спекл-голография в экспериментальной механике. Пенза: Изд-во Пензенской государственной технологической академии, 2010. 199 с.

9. *Seменов V.N.* A comparison of the weight ration of the airframe designs of aircraft with a cantilever wing and with

a closed wing system: Technical Memorandum. 1985. Report number NASA TM-77842. Pp. 45–49.

10. *Новосельцев С. В., Семенов В. Н.* Исследование аэродинамических и прочностных характеристик самолета с замкнутой бипланной системой крыльев // Техника воздушного флота. 1984. № 7. С. 1–5.

11. *Malchevsky V.V.* The design of very large commercial transport aircraft with nontraditional configuration. ISTS501–98. Moscow, 2001. Pp. 78–79.

12. *Саурин В. В., Семенов В. Н.* Оптимизация формы замкнутой балочной структуры под распределённую нагрузку // Ученые записки ЦАГИ. 1992. Т. 23. № 3. С. 85–93.

13. *Семенов В. Н.* Конструкции самолетов замкнутой и изменяемой схем. М.: ЦАГИ, 2006. 228 с.

14. *Мовчан А. А., Со Ньютт, Семенов В. Н.* Проектирование силовозбудителя крутящего момента из сплава. М.: ЦАГИ, 2006. С. 102–104.

15. *Гуревич М. М.* Фотоматерия. Л.: Энергоатомиздат, 1983. С. 98–99.

## STUDY OF STRESS-STRAIN STATE AND TYPE OF STRESS STATE OF A CLOSED MODEL OF THE WING USING SPECKLE INTERFEROMETRY

### NYAN MIN HTET

Zhukovsky, Russia, nyanminhtet@gmail.com

### IGOR V. VOLKOV

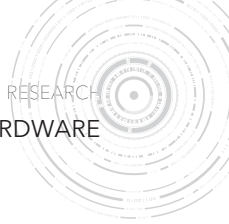
Zhukovsky, Russia, volkoviv39@mail.ru

**KEYWORDS:** stressed-deformed state; experimental and computational analysis of speckle holographic interferometry; model closed wing; design aircraft; the experimental load device.

### ABSTRACT

*Object.* In this work, the stress-strain state of the model closed wing of the aircraft is investigated by experimental and computational analysis using speckle-holographic interferometry. *Purpose.* As a result of the study of the wing model, to reveal and demonstrate the possibilities of experimental and computational analysis using speckle holography. *Methodology.* Experimental study of the stress-strain state of structures was carried out using an experimental load device. *Results.* An algorithm for experimental and computational analysis of the stress-strain state of structures using speckle holography is developed and the results of studies are demonstrated on the

example of an experimental load device. *Scope of the results.* The research results can be used to develop the concept of the power circuit of the aircraft with a closed system of wings, which is structurally one of the most promising, as it has many potential advantages related to the reduction of its weight, increase stiffness and decrease deformations, with the possibility of direct control of lift and side forces. *Summary.* One of the most important aspects of speckle holographic interferometry is the quality of the resulting speckle hologram, on which its diffraction efficiency largely depends. At the same time, the improvement of diffraction efficiency in solving practical problems is carried out due to the selection of the developer of pho-



tographic plates, the installation of a certain exposure time and the choice of methods of processing photographic plates. However, in practice, there are often problems of obtaining the maximum diffraction efficiency of holograms. We made the choice of developer, exposure time, as well as methods of photo processing of speckle holograms in counter beams in the course of practical experiment. *Practical significance.* The described technology unextendable registration of speckle holograms can be used in the research process VAT field aviakonstruktor in the zones of stress concentration, as well as their identification during the industrial field tests.

## REFERENCES

1. Volkov I.V. Izmerenie polya peremeschenij i deformacij naturnogo obrazca vblizi koncentratora napryazhenij s pomosh'yu "Speckle" golografii [The Measurement of displacement field and strain field of the specimen close to the hub of voltages, using the "Speckle" of holography]. *Problemy prochnosti* [Strength of Materials]. 1975. No. 9. Pp. 89-91.
2. Volkov I.V. Primenenie spekl-golografii dlya izmereniya komponent deformacij naturnyh konstrukcij [Application of speckle holography for measurement of components of deformations of full-scale structures]. *Materialy 7 Vsesoyuznoj shkoly po golografii* [Proc. of the 7 all-Union school of holography of the USSR, Rostov, January 14-23, 1975]. Leningrad: LIAP Publ., 1975. Pp. 305-318.
3. Volkov I.V. Vnestendovaya golografiya. Novye golograficheskie i spekl- interferometricheskie metody v `eksperimental'noj mehanike [Holography. New holographic and speckle interferometric methods in experimental mechanics]. *University proceedings. Volga region. Technical sciences.* 2005. No. 5 (20). Pp. 201-211.
4. Volkov I.V. Using the speckle holography method in experimental mechanics. *Measurement techniques.* 2017. Pp. 161-165.
5. Volkov I.V., Vyshinsky V.V., Kislovskiy O.A. Theoretical bases of the speckle-holography method in experimental mechanics. *Proceedings of MIPT.* 2017. Vol. 9. No. 2. Pp. 13-22.
6. Volkov I.V., Nyan Min Htet, Wai Hlaing Oo, Tun Min Lat. Determination of physical and mechanical characteristics of materials in the study of the concentration of stresses in samples with holes. *Proceedings of MIPT.* 2018. Vol. 10. No. 1. Pp. 68-74.
7. Nyan Min Htet, Tun Min Lat, Wai Hlaing Oo, Volkov I.V. Calculation-experimental method of analyzing stress-strain state of aviakonstruktor. *Proceedings of MIPT.* 2018. Vol. 10. No. 4 (40). Pp. 131-136.
8. Volkov I.V. *Spekl-golografiya v `eksperimental'noj mehanike* [Speckle-holography in experimental mechanics]. Penza: Penza state technological Academy Publ., 2010. 199 p.
9. Semenov V.N. A comparison of the weight ration of the airframe designs of aircraft with a cantilever wing and wing with a closed system: Technical Memorandum. 1985. Report number NASA TM-77842. 1985. Pp. 45-49.
10. Novoseltsev S.V., Semenov V.N. Issledovanie aërodynamiceskikh i prochnostnykh karakteristik samoleta s zamknutoj biplannoj sistemoy kryl'ev [Study of aerodynamic and strength characteristics of the aircraft with a closed biplane wing system]. *Tehnika vozdušnogo flota* [Equipment of air fleet]. 1984. No. 7. Pp. 1-5.
11. Malchevsky V.V. The design of the very large commercial transport aircraft with nontraditional configuration, ISTS501-98. Moscow, 2001. Pp. 78-79.
12. Saurin V.V., Semenov V.N. Optimization of the form of a closed beam structure under a distributed load. *Uchenye zapiski TsAGI* [TsAGI Science Journal]. 1992. No. 3. Pp. 85-93.
13. Semenov V.N. *Konstrukcii samoletov zamknutoj i izmenyaemoj shem* [Aircraft design a closed-loop and variable schemes]. Moscow: TSAGI, 2006. 228 p.
14. Movchan A.A., So Nyunt, V.N. *Proektirovanie silovozbuditel'ya krutyaschego momenta iz splava* [Semenov Design Energizer torque of the alloy]. Moscow: TSAGI, 2006. Pp. 102-104.
15. Gurevich M.M. *Fotomateriya* [Fotomature]. Leningrad: Energoatomizdat, 1983. Pp. 98-99.

## INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Nyan M.H., Postgraduate student of the Department of strength of aircraft of Moscow Institute of Physics and Technology;  
 Volkov I.V., PhD, Senior researcher of the Department of Applied mechanics and Informatics of the Moscow Institute of Physics and Technology.



doi: 10.24411/2409-5419-2018-10292

# ПОГРУЖЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ВОДЯНЫХ ЗНАКОВ В АУДИОСИГНАЛЫ С ПОМОЩЬЮ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЧАСТОТНО СЕЛЕКТИВНОГО ИЗМЕНЕНИЯ ФАЗЫ

**АЛЕКСЕЕВ****Василий Геннадьевич<sup>1</sup>****КОРЖИК****Валерий Иванович<sup>2</sup>****АННОТАЦИЯ**

Методы вложения стеганоинформации в аудиосигналы, основанные на манипуляциях с фазой сигнала представляют большой интерес, так как слуховая система человека восприимчива к изменению фазы звукового сигнала слабее, нежели к изменению его амплитуды или частоты. Метод погружения стеганоинформации в аудиосигналы, основанный на частотно селективном изменении фазы, при котором исходный сигнал разбивается на 32 частотных поддиапазона, часть из которых выбирается для вложения дополнительных данных с помощью фазовых фильтров, устойчив к стандартным манипуляциям аудиоданными, таким как сжатие с потерями, изменение частоты дискретизации, микширование, квантования, добавление шума, а так же к де-синхронизирующим атакам. Возможно «слепое» выделение погруженной информации. Максимальная скорость вложения данных может превышать 1000 бит в одну секунду аудиозаписи для стереосигналов. Метод можно использовать как для скрытия данных, так и для внедрения цифровых водяных знаков с целью подтверждения неизменности исходных данных. Алгоритм может быть оптимизирован для работы с музыкальными произведениями записанными, с частотой дискретизации 44 кГц, 32 кГц или 22 кГц. Для решения вопроса синхронизации при выделении вложенной информации используется механизм «значимых точек». Местами появления таких точек выбираются положения быстрых переходов энергии, так как их определение не требует больших вычислительных усилий, и положение самих точек остается неизменным при стандартных манипуляциях с аудиоданными. В детекторе сигнал каждого из выбранных для вложения поддиапазонов, подвергается быстрому z-преобразованию по спиральному контуру для выявления применяемого при вложении фильтра.

**Сведения об авторах:**

<sup>1</sup>Общество с ограниченной ответственностью  
«Орион», г. Санкт-Петербург, Россия,  
i@vasay.ru

<sup>2</sup>д.т.н, профессор, профессор  
Санкт-Петербургского государственного  
университета телекоммуникаций имени  
профессора М.А. Бонч-Бруевича,  
г. Санкт-Петербург, Россия, val-korzhih@yandex.ru

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** стеганография; цифровые водяные знаки; фаза аудиосигнала; значимые точки; вейвлет Добеши; слуховая система человека; стандарт сжатия.

**Для цитирования:** Алексеев В.Г., Коржик В.И. Погружение цифровых водяных знаков в аудиосигналы с помощью использования частотно селективного изменения фазы // Научные исследования в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 6. С. 22-29.  
doi: 10.24411/2409-5419-2018-10292

## Ведение

Предлагаемый в статье метод погружения информации в аудиосигналы основывается на низкой чувствительности человеческого слухового аппарата к изменениям фазы аудиосигнала [1]. К основным его особенностям относятся устойчивость к стандартным манипуляциям аудиоданными, таким как сжатие с потерями, изменение частоты дискретизации, микширование, квантизация, добавление шума, устойчивость к де-синхронизирующим атакам, возможность «слепого» выделения погруженной информации. Максимальная скорость вложения данных может превышать 1000 бит на одну секунду аудиозаписи. Метод можно использовать как для скрытия данных, так и для внедрения цифровых водяных знаков. Алгоритм оптимизирован для работы с музыкальными произведениями записанными, с частотой дискретизации 44 кГц, 32 кГц или 22 кГц. Метод основан на идее, представленной в работе [2].

Схемы погружения и извлечения данных приведены на рис. 1.

### Нахождение значимых точек

Важным моментом в реализации рассматриваемого метода является обеспечение синхронизации при погружении и извлечении цифровых водяных знаков (ЦВЗ). Это необходимо для того, чтобы обеспечить нахождения ЦВЗ в аудиосигнале и сделать его устойчивым к де-синхронизирующим атакам таким, как удаление некоторых отсчетов сигнала и микширование. При этом использование каких-либо дополнительных синхросигналов крайне нежелательно, так как они могут вызвать допол-

нительные слышимые искажения, а также увеличивают вероятность обнаружения вложения атакующим. По этим причинам был выбран другой подход — использование значимых точек (или «SP», Salient point) [3]. Выбор SP может основываться на различных естественных особенностях аудиосигнала.

Метод выделения SP должен обеспечивать один и тот же набор SP как до, так и после атак, таких как сжатие, добавление шума, или прохождение сигнала через фильтр нижних частот. Для того, чтобы достичь этого, извлечем SP, основываясь на тех особенностях звукового сигнала, к которым было бы чувствительно человеческое ухо. Таким образом, если атакующий решит уничтожить SP, он должен будет сильно исказить аудио сигнал.

При реализации данного метода погружения ЦВЗ, местами появления таких точек были выбраны положения быстрых переходов энергии, так как их определение не требует больших вычислительных усилий, и положение самих точек остается неизменным при стандартных манипуляциях с аудиоданными [4].

Рассмотрим аудио сигнал  $x(n)$  состоящий из  $N$  отсчетов ( $n = 1, \dots, N$ ). Процедура анализа аудио сигнала будет выглядеть следующим образом:

1. Аудио сигнал проходит через полосовой фильтр, который отбрасывает частоты, не воспринимаемые человеком.
2. Для каждого отсчета  $x(n)$  в аудио сигнале, энергия  $g$  отсчетов до точки  $n$  и энергия  $r$  отсчетов после точки  $n$  вычисляется по формулам:

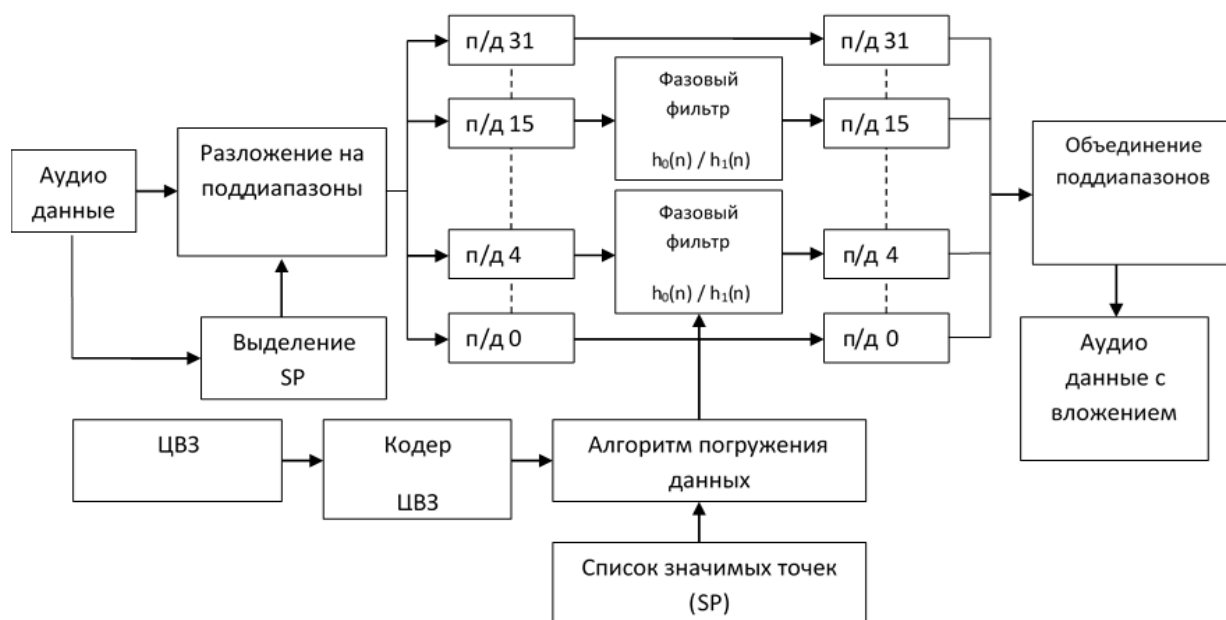


Рис. 1. Схема погружения данных



$$\begin{cases} E_{before}(n) = \sum_{i=-r}^{-1} x^2(n+i) \\ E_{after}(n) = \sum_{i=0}^{r-1} x^2(n+i) \end{cases}$$

3. Для каждого  $x(n)$  вычисляется отношение:

$$ratio(n) = \frac{E_{after}(n)}{E_{before}(n)}$$

4. Если отношение  $ratio(n) > T_1$  и  $E_{after}(n) > T_2$ , то  $x(n)$  помечается как точка быстрого возрастания энергии.

5. Точки быстрого возрастания энергии обычно появляются группами. Точки, отделенные количеством отсчетов, меньшим, чем  $T_3$  объединяются в одну большую группу.

6. В каждой группе, отсчет, имеющий наибольшее значение  $ratio(n)$ , считается SP.

7. Если SP получен из группы, где наибольшее  $ratio(n)$  находится в первых  $T_4$  отсчетах, то SP удаляется.

8. Первые  $2^p$  отсчетов следующими за SP считаются областью, чувствительной к атаке.

Шаг 1 служит для предотвращения атаки добавления неслышимого сигнала (сигнала с частотой за пределом слышимости) с большой энергией, который повлиял на процесс выделения SP. Шаги со 2-го по 6-й ищут точки, где энергия растет наиболее быстро. Условие  $E_{after}(n) > T_2$  необходимо для того, чтобы  $x(n)$  не считался «значимой точкой», только потому, что имеет почти нулевое значение. Пункты с 5-го по 7-й служат для улучшения стабильности SP. Они предотвращают слияние или удаление групп точек быстрого возрастания энергии, которое может произойти при искажении сигнала из-за сжатия, или добавления шумов.

Пороги  $T_3$  и  $T_4$  могут быть установлены в 30 и 100, соответственно, а  $T_1$  и  $T_2$  подбираются для каждого конкретного случая.

Вычисления во втором шаге могут быть упрощены: Параметры выделения SP выбираются таким образом, чтобы обеспечить появление 4–6 точек на одну секунду сигнала [5].

Начиная с первого SP, аудиосигнал разбивается на блоки. Принцип разбиения на блоки показан на рис. 2:

Как видно из рис. 2, после SP1 блоки идут последовательно, один за другим, до тех пор, пока количество отсчетов сигнала, оставшееся от конца последнего блока SP2, не будет меньше длины блока. Тогда, эти отсчеты не используются для погружения битов ЦВЗ, а следующий блок начинается с SP2.

Длина блока не может быть меньше 640 отсчетов, это связано с особенностями разложения на поддиапазоны, таким образом, при частоте дискретизации 32 кГц один блок охватывает 20 мсек. сигнала, а при частоте дискретизации 44 кГц–15 мсек.

### Разложение на поддиапазоны

Сигнал в каждом блоке, при помощи дискретного вейвлет-преобразования [6], разбивается на 32 частотных поддиапазона. Для обеспечения стойкости и скрытности вложения, ЦВЗ вкладывается только в некоторые частотные полосы.

В предлагаемой схеме погружения ЦВЗ, сигнал разбивается на 32 поддиапазона, а для вложения выбираются диапазоны с 4 по 15. Диапазоны с 16 по 32 не используются в связи с тем, что при сжатии аудио сигнала они кодируются с наибольшими потерями [7], а вложения в первые три поддиапазона вызывают слышимые искажения.

Для разложения сигнала на поддиапазоны воспользуемся пятиуровневым вейвлет разложением сигнала с использованием вейвлета Добеши десятого порядка. Данный вейвлет позволяет восстановить сигнал после разложения с погрешностью не превышающей  $5,2 \cdot 10^{-12}$  [8].

Преобразование, как прямое, так и обратное, рассчитывается путем вычисления свертки сигнала в каждой

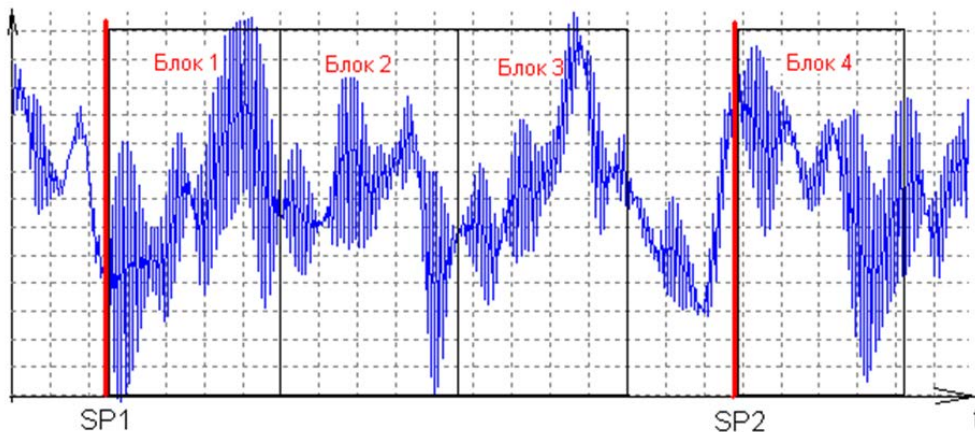


Рис. 2. Принцип разбиения сигнала на блоки



его точке с функцией вейвлета, называемой фильтром [9]. В дискретном случае фильтры задаются просто перечислением их значений (коэффициентов) в точках дискретизации. Сигнал преобразуется с использованием двух дополняющих друг друга фильтров — низких и высоких частот. Вейвлет Добеши относится к классу квадратурных зеркальных фильтров (КЗФ). Особенностью этого класса фильтров является то, что фильтр высоких частот получается из соответствующего фильтра низких частот простой перестановкой его коэффициентов в обратном порядке и изменением знака половины из них, причем только четных или только нечетных. При этом вейвлет выделяет локальные особенности сигнала в каждой точке и является, таким образом, фильтром высоких частот, а соответствующий фильтр низких частот описывается так называемой масштабирующей функцией.

Продуктом прямого преобразования являются два сигнала, один из которых, называемый аппроксимирующим. Он несет информацию о низких частотах исходного сигнала, другой, называемый детализирующим — о высоких. Длина этих сигналов может быть уменьшена в два раза, так как частотный диапазон каждого из них сокращается вдвое относительно частотного диапазона исходного сигнала.

Аппроксимирующий и детализирующий сигналы вычисляются по формуле (1):

$$\begin{cases} Aprox[i] = S[i] \cdot db[19] + S[i-1] \cdot db[18] + \dots + S[i-18] \cdot db[1] + S[i-19] \cdot db[0] \\ Details[i] = S[i] \cdot db[0] - S[i-1] \cdot db[1] + \dots - S[i-18] \cdot db[18] + S[i-19] \cdot db[19] \end{cases} \quad (1)$$

где  $S$  — отсчеты исходного сигнала;

$db$  — отсчеты вейвлета Добеши.

Для того чтобы разложить исходный сигнал на 32 частотных поддиапазона необходимо повторить преобразование пять раз. На рис. 3 показаны первые 3 три уровня разложения.

Результатом преобразований станут 32 сигнала, длиной  $1/32$  исходного.

Двенадцать из них, с четвертого по пятнадцатый включительно, считаются пригодными для погружения ЦВЗ. Верхние частоты не используются, потому что при сжатии с потерями и при понижении частоты дискретизации они просто отбрасываются. Такое разбиение необходимо, для того чтобы сделать вложение менее заметным для человеческого уха и более устойчивым к атакам по его удалению.

При этом нужно иметь в виду, что длина полученных сигналов не должна быть меньше длины вейвлета, т.е. меньше 20 отсчетов. Таким образом, длина одного блока должна быть больше  $32 \cdot 20 = 640$  отсчетов, что, при частоте дискретизации 32 кГц, соответствует 20 миллисекундам. Учитывая, что в один блок вкладывается 12 бит, максимальная скорость погружения ЦВЗ не может превышать 600 бит/сек (1200 бит/сек для двухканального стерео сигнала).

### Погружение информации

В каждый из двенадцати выбранных поддиапазонов вкладывается по одному биту ЦВЗ. Для погружения информации отсчеты поддиапазонов проходит через один из двух фазовых фильтров. Один из фильтров применяется если нужно вложить «1», другой если нужно вложить «0». В формуле 2 приведены передаточные функции фильтров.

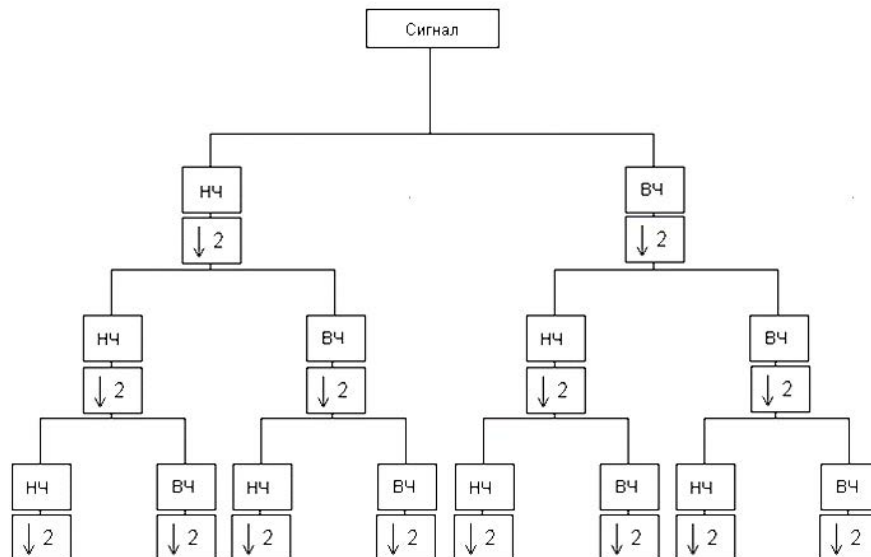


Рис. 3. Три уровня разложения вейвлет преобразования

$$\begin{aligned}
 1) \quad H(z) &= \frac{1+1,273 \cdot z+0,81 \cdot z^2}{0,81+1,273 \cdot z+z^2} \\
 2) \quad H(z) &= \frac{1-1,273 \cdot z+0,81 \cdot z^2}{0,81-1,273 \cdot z+z^2}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Особенность данных фильтров заключается в том, что их амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) равна единице во всем диапазоне частот. Следствием этого является то, что фильтры изменяют только фазу сигнала, оставляя его амплитуду без искажений.

Карты нулей и полюсов (КНП) этих фильтров показаны на рис. 4 и рис. 5 соответственно:

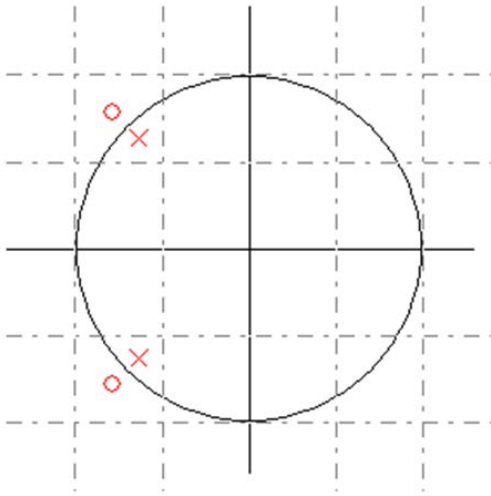


Рис. 3. КНП первого фильтра

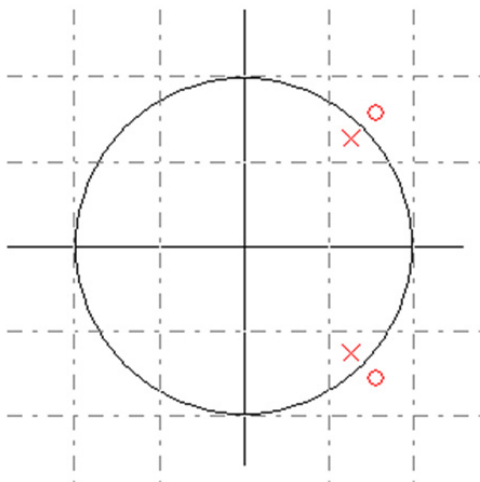


Рис. 5. КНП второго фильтра

Отсчеты сигнала на выходе фильтров вычисляются по формулам (3)

$$\begin{aligned}
 1) \quad S_{\text{вых}}[i] &= 0,81 \cdot S_{\text{вх}}[i] + 1,273 \cdot S_{\text{вх}}[i-1] + S_{\text{вх}}[i-2] - \\
 &- 1,273 \cdot S_{\text{вых}}[i-1] + 0,81 \cdot S_{\text{вых}}[i-2] \\
 2) \quad S_{\text{вых}}[i] &= 0,81 \cdot S_{\text{вх}}[i] - 1,273 \cdot S_{\text{вх}}[i-1] + S_{\text{вх}}[i-2] + \\
 &+ 1,273 \cdot S_{\text{вых}}[i-1] + 0,81 \cdot S_{\text{вых}}[i-2]
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

где  $S_{\text{вх}}$  — отсчеты входного сигнала;  
 $S_{\text{вых}}$  — отсчеты выходного сигнала.

### Извлечение информации

Для извлечения вложенной информации сигнал также разлагается на 32 частотных поддиапазона. Далее необходимо определить, «1» или «0» были вложены в соответствующий поддиапазон.

Данная задача сводится к нахождению примененного ранее при погружении ЦВЗ фазового фильтра. Для ее решения используется метод спектрального анализа сигнала, который позволяет определить положение «нулей» фильтров, через которые проходил сигнал.

Из рис. 4 и рис. 5 видно, что нули фильтров имеют одинаковые радиусы  $r_0 = 1/0,9$ , и разные углы:  $\hat{\omega}_{01} = 0,75\pi$  и  $\hat{\omega}_{02} = 0,25\pi$ .

В детекторе сигнал каждого из двенадцати, выбранных для вложения поддиапазонов, подвергается быстрому  $z$ -преобразованию по спиральному контуру с радиусом  $r = 1/0,9$  [10].

$z$ -преобразование по спиральному контуру было выбрано, так как оно позволяет определить положение нулей используемых при вложении фильтров. В общем случае оно вычисляется по формуле (4):

$$X(Z_k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)A^{-n}W^{nk}k,
 \tag{4}$$

где  $k = 0, 1, \dots, M-1$ ;

$W = W_0 \exp(-j\phi_0)$ ;

$A = A_0 \exp(-j\theta_0)$ .

В нашем случае, для определения примененного к сигналу фильтра, контур  $z$ -преобразования имеет вид окружности с радиусом  $r = 1/0,9$ . Такой радиус выбран в связи с тем, что нули обоих фазовых фильтров лежат на удалении  $r = 1/0,9$ , от центра окружности (см. рис. 4 и 5).

Примем  $W_0 = 1$ , а  $A_0 = 1/0,9$ , тогда формула (4) примет вид:

$$X_k = \exp(-j\phi_0 k^2 / 2)$$

$$\sum_{n=0}^{N-1} x_n 0,9^{-n} \exp(-j\theta_0) \exp(-j\phi_0 n^2 / 2) \exp(-j\theta_0 (k-n)^2 / 2),$$

$k = 0, 1, \dots, M-1$  (5)



В этом случае вычисление  $z$ -преобразования по контуру с  $r = 1/0,9$  можно произвести по схеме, показанной на рис. 6:

FFT — прямое быстрое преобразование Фурье, IFFT — обратное быстрое преобразование Фурье.

На рис. 7 и рис. 8 показаны графики относительного спектра амплитуд сигналов.

Как видно из графиков, полученные спектры амплитуд имеют минимумы в точках соответствующих углу нулей фильтров. Таким образом, задача детектирования вложенных битов сводится к определению положения минимума в спектры амплитуд.

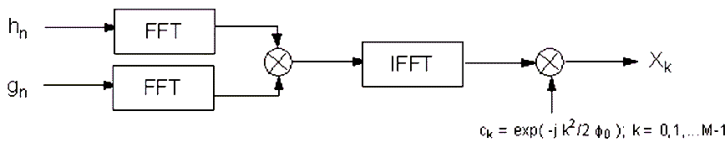


Рис. 6. Схема вычисления  $z$ -преобразования по контуру

### Стойкость информации вложенной в аудиосигнал к атакам по ее удалению

Устойчивость вложения к десинхронизирующим атакам (микширование, удаление отсчетов) полностью определяется надежностью выделения значимых точек. Сжатие с потерями, квантование, фильтрация могут вносить дополнительные ошибки.

Использование разбиения на частотные поддиапазоны защищает вложение от уменьшения частоты дискретизации вдвое. Дальнейшее ее уменьшение приводит к удалению вложенной информации по причине потери информации в верхних частотных поддиапазонах, выбранных для вложения, однако это так же приводит и к заметным на слух изменениям звучания сигнала. Аналогичная ситуация происходит и с применением фильтра нижних частот.

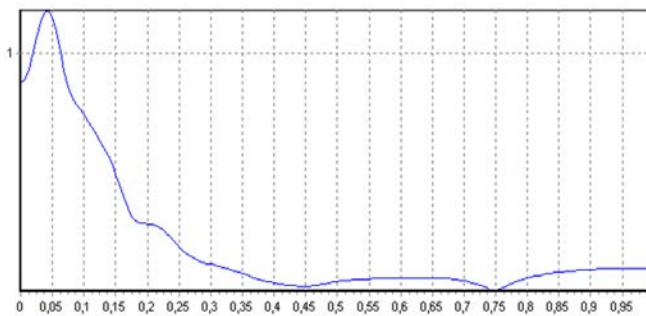


Рис. 7. Относительный спектр амплитуд сигнала с вложенным «0»

При сжатии с потерями вероятность появления ошибки зависит как от степени сжатия, так и от размера блока, применяемого для вложения 12 бит.

Исследуемый метод был программно реализован на языке с++. Были произведены эксперименты по погружению и извлечению информации в различные аудиосигналы.

В табл. приведены зависимости процента ошибок от степени сжатия mp3 и длины блока на котором производилось вложение 12 бит, полученные во время экспериментов.

Таблица

Зависимость процента ошибок от степени сжатия mp3 и длины блока

Длина блока вложения 12 бит	Вероятность ошибки при выделении ЦВЗ			
	Без сжатия	256 кбит/сек	128 кбит/сек	VBR
1280 отсчетов	4%	8%	22%	ЦВЗ удален
3200 отсчетов	3%	6%	15%	25%
4800 отсчетов	1%	4%	7%	11%

### Заключение

Если сравнивать предлагаемый метод с другими перспективными алгоритмами погружения ЦВЗ в аудиосигналы, например, основанными на использовании эхосигналов [11] и ревербераций [12] к его достоинствам можно отнести:

- скорость вложения более 1000 бит в секунду для стереосигналов с частотой дискретизации 40 кГц.
- устойчивость к стандартным цифровым манипуляциям аудиоданными;
- использование неинформированного декодера;
- возможность определения декодером мест возникновения ошибок;
- более высокую незаметность вложений.

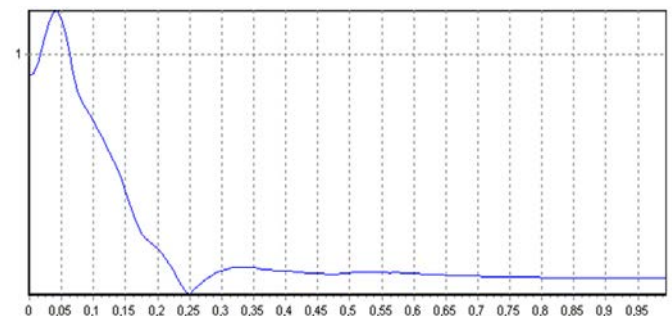


Рис. 8. Относительный спектр амплитуд сигнала с вложенным «1»



Однако метод имеет и некоторые недостатки:

- возможность проведения преднамеренной атаки по удалению ЦВЗ;
- сильная зависимость надежности выделения ЦВЗ от точности синхронизации начала блока.

### Литература

1. Вологдин Э.И. Слух и восприятие звука. Курс лекций. СПб.: Владос, 2012. С. 32.
2. Bender W., Gruhl D., Morimoto N., Lu A. Techniques for data hiding // IBM Systems Journal. 1996. No. 35(3/4). Pp. 313–336.
3. Fulchiron P.-Y., Silvestre G. C. M., Hurley N. J. Synchronisation of Audio Watermarking by Salient Point Extraction // Proc. of the Irish Signals and Systems Conference, Limerick, Ireland, July 2003. IEEE, 2003 Pp. 40–45.
4. Hamidi M., Chetouani A., El Haziti M., El Hassouni M., Cherifi H. Blind Robust 3D Mesh Watermarking Based on Mesh Saliency and Wavelet Transform for Copyright Protection // Information. 2019. No. 10(2). URL: <https://doi.org/10.3390/info10020067> (дата обращения 15.08.2019).
5. Korzhik V., Alekseev V., Morales-Luna G. Audio watermarking system resistant to removal attacks by dereverberation // International Journal of Computer Science and Applications. 2018. No. 15(1). Pp. 1–15.
6. Mallat S. *A Wavelet Tour of Signal Processing*. 3rd Edition. Orlando, FL, USA: Academic Press, 2008. 832 p. doi:10.1016/B978-0-12-374370-1.X0001-8
7. Nilsson M. The audio/mpeg Media Type. RFC3003, November 2000. doi:10.17487/RFC3003 URL: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc3003> (дата обращения 15.08.2019).
8. Daubechies I. *Ten Lectures on Wavelets*. Philadelphia, SIAM 1992. 357 p.
9. Popov D., Gapochkin A., Nekrasov A. An Algorithm of Daubechies Wavelet Transform in the Final Field When Processing Speech Signals // Electronics. 2018. Vol. 7. No. 7. URL: <https://doi.org/10.3390/electronics7070120> (дата обращения 15.08.2019).
10. Rajmic P., Prusa Z., Wiesmeyr C. Computational cost of Chirp Z-transform and Generalized Goertzel algorithm // Proceedings of 22nd European Signal Processing Conference (Lisbon, Portugal, 1–5 Sept. 2014). IEEE, 2014. Pp. 1004–1008.
11. Korzhik V., Morales-Luna G, Fedyanin I. Audio watermarking based on echo hiding with zero error probability // International Journal of Computer Science and Applications. 2013. No. 10(1). Pp. 1–10.
12. Arend J.M., Pörschmann C. Audio Watermarking of Binaural Room Impulse Responses // Proceedings of Audio Engineering Society International Conference on Headphone Technology, Aalborg, Denmark, 24–26 August 2016. URL: <https://doi.org/10.17743/aesconf.2016.978-1-942220-09-1> (дата обращения 15.08.2019).







## EMBEDDING OF DIGITAL WATERMARK SIGNALS WITH THE USE OF A FREQUENCY SELECTIVE PHASE CHANGING

**VASILII G. ALEKSEEV,**

St. Petersburg, Russia, i@vasay.ru

**VALERY I. KORZHIK,**

St. Petersburg, Russia, val-korzhiik@yandex.ru

**KEYWORDS:** steganography; digital watermarks; phase of audio signal; salient points; Daubechies wavelets; human auditory system.

### ABSTRACT

Embedding of digital watermarks into audio signals based on phase manipulations lies in area of great research interests, because human auditory system is less sensitive to some phase changing than to amplitude or frequency modulation. The proposed embedding method of a frequency selective phase changing is resistant to standard transformation of audio signal like lossy compression, changing of sampling frequency, requantization and mixing. Maximal embedding rate can be provided at least 1000 bit/sec. Embedding algorithm can be matched with musical works with sampling frequency 44kHz, 32kHz or 22kHz. In order to provide a resistance of synchronization problem during different signal transformation can be used well know method of "salient point". Resistance of the proposed watermarks system to mp3 compression algorithm against block length is investigated.

### REFERENCES

1. Vologdin E.I. *Sluh i vospriyatie zvuka. Kurs lekcij* [Hearing and sound perception. Lecture course] St. Petersburg: Vlados, 2012. P. 32. (In Russian)
2. Bender W., Gruhl D., Morimoto N., Lu A. Techniques for data hiding. *IBM Systems Journal*. 1996. No. 35(3/4). Pp. 313-336.
3. Fulchiron P-Y., Silvestre G.C. M., Hurley N.J. Synchronisation of Audio Watermarking by Salient Point Extraction. *Proc. of the Irish Signals and Systems Conference, Limerick, Ireland, July 2003*. IEEE, 2003 Pp. 40-45.
4. Hamidi M., Chetouani A., El Haziti M., El Hassouni M., Cherifi H. Blind Robust 3D Mesh Watermarking Based on Mesh Saliency and Wavelet Transform for Copyright Protection. *Information*. 2019. No. 10(2). URL: <https://doi.org/10.3390/info10020067> (date of access 15.08.2019).
5. Korzhik V., Alekseev V., Morales-Luna G. Audio watermarking system resistant to removal attacks by dereverberation. *International*

- Journal of Computer Science and Applications*. 2018. No. 15(1). Pp. 1-15.
6. Mallat S. *A Wavelet Tour of Signal Processing*. 3rd Edition. Orlando, FL, USA: Academic Press, 2008. 832 p. doi:10.1016/B978-0-12-374370-1.X0001-8
7. Nilsson M. The audio/mpeg Media Type. RFC3003, November 2000. doi:10.17487/RFC3003 URL: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc3003> (date of access 15.08.2019).
8. Daubechies I. *Ten Lectures on Wavelets*. Philadelphia, SIAM 1992. 357 p.
9. Popov D., Gapochkin A., Nekrasov A. An Algorithm of Daubechies Wavelet Transform in the Final Field When Processing Speech Signals. *Electronics*. 2018. Vol. 7. No. 7. URL: <https://doi.org/10.3390/electronics7070120> (date of access 15.08.2019).
10. Rajmic P., Prusa Z., Wiesmeyr C. Computational cost of Chirp Z-transform and Generalized Goertzel algorithm. *Proceedings of 22nd European Signal Processing Conference (Lisbon, Portugal, 1-5 Sept. 2014)*. IEEE, 2014. Pp. 1004-1008.
11. Korzhik V., Morales-Luna G., Fedyanin I. Audio watermarking based on echo hiding with zero error probability. *International Journal of Computer Science and Applications*. 2013. No. 10(1). Pp. 1-10.
13. Arend J.M., Pörschmann C. Audio Watermarking of Binaural Room Impulse Responses. *Proceedings of Audio Engineering Society International Conference on Headphone Technology, Aalborg, Denmark, 24-26 August 2016*. URL: <https://doi.org/10.17743/aesconf.2016.978-1-942220-09-1> (date of access 15.08.2019).

### INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Alekseev V.G., Orion LTD;

Korzhiik V.I., PhD, Full Professor, Professor of The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications.



doi: 10.24411/2409-5419-2018-10293

# К ВОПРОСУ ОБОСНОВАНИЯ ПОНЯТИЙНОГО АППАРАТА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМЫ СВЯЗИ И РАДИОТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АЭРОДРОМА

**ВИНОГРАДЕНКО****Алексей Михайлович<sup>1</sup>****МЕЖЕНОВ****Алексей Викторович<sup>2</sup>****БУДКО****Никита Павлович<sup>3</sup>****АННОТАЦИЯ**

Работа посвящена поиску новых методов диагностики и обоснованию понятийного аппарата «экспресс-контроля» состояния сложных технических систем с высокой ценой отказа. Актуальность исследования вызвана тем, что в государственных стандартах определено понятие экспресс-диагностирования, однако не раскрыта сущность такой ее составляющей, как экспресс-контроль, под которым в работе предлагается понимать определение вида технического состояния объекта по ограниченному числу контролируемых параметров в реальном масштабе времени, или близкому к нему. Представлен подход к выбору параметров, включаемых в процедуру экспресс-контроля на основе метода экспертных оценок, а также продолжительности его проведения и периодичности. Сформулированы общие принципы организации и проведения экспресс-контроля в системном аспекте, рассматривающие процедуру его осуществления с общих позиций, независимо от применяемых технологий. В работе процесс проведения экспресс-контроля раскрыт на примере диагностирования системы связи и радиотехнического обеспечения аэродрома с представлением варианта построения территориально-распределенного поля значений параметров качества объекта контроля, получаемого с использованием методов неразрушающего контроля с применением доступных летно-подъемных средств. При этом вид технического состояния средств связи и радиотехнического обеспечения в процессе экспресс-контроля определяется нахождением контролируемых параметров в пределах установленных интервалов допусков для конкретного типа радиоэлектронных средств. Рассматривая систему связи и радиотехнического обеспечения как открытую, распределенную, динамическую, вероятностную и сложную систему, предлагается в подсистеме экспресс-контроля наряду с эксплуатационными допусками на контролируемые параметры использовать также и профилактические допуски, адаптируемые к внутренним и внешним условиям функционирования системы. При этом порядок определения профилактических допусков осуществляется как с использованием классического подхода, для двухпараметрического пространства, так и в зависимости от числа включенных эксплуатационных параметров в процедуру экспресс-контроля – для многопараметрического пространства объектов контроля.

**Сведения об авторах:**

<sup>1</sup>к.т.н., доцент, докторант Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия, vinogradenko.a@inbox.ru

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

<sup>3</sup>соискатель, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия, budko62@mail.ru

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** экспресс-диагностирование; экспресс-контроль; контроль технического состояния; параметры; эксплуатационные допуски; профилактические допуски; продолжительность контроля.

**Для цитирования:** *Винограденко А.М., Меженев А.В., Будко Н.П.* К вопросу обоснования понятийного аппарата неразрушающего экспресс-контроля технического состояния оборудования системы связи и радиотехнического обеспечения аэродрома // Научно-технические исследования в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 6. С. 30-44. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10293



## Введение

Эффективность сложных технических систем (СТС), таких как: космические и летательные аппараты; стартовые и ракетные комплексы; ядерные энергетические установки атомные электростанции; автоматизированные системы управления связью (АСУС); средства радиотехнического обеспечения (РТО) аэродромов и пр. на протяжении своих этапов жизненного цикла (ЖЦ) напрямую зависят от значений показателей текущей надежности [1]. Последствия проявления неисправностей (отказов) или дефектов в них могут привести к трагедиям и глобальным катастрофам с большими человеческими жертвами, значительным экологическим ущербом и финансовыми потерями. В связи с чем, вопросам проведения мероприятий по диагностике, мониторингу технического состояния (контролю), включая контроллинг [2] СТС в последнее время уделяется первостепенное значение. Так, на внедрение мероприятий неразрушающего контроля и связанных с данным направлением работ на эксплуатационных этапах жизненного цикла атомной электростанции затраты составляют до 50% всех эксплуатационных затрат [3]. Категоричность современных экологических нормативов, а также требований общественности о необходимости исключения техногенных катастроф и аварий на авиационной и космической технике, происходящих с частотой 600–700 в год [3] с человеческими жертвами и огромным ущербом для окружающей среды, делает проблему поддержания надежности и безопасности СТС наземных и бортовых авиационных комплексов актуальной.

Статья посвящена поиску новых методов диагностики и обоснованию понятийного аппарата «экспресс-контроля» технического состояния СТС на примере системы связи и радиотехнического обеспечения аэродрома.

## Понятие экспресс-контроля для сложных технических систем с высокой ценой отказа

На сегодня высокая динамика изменения условий работы СТС из-за различных случайных и преднамеренных дестабилизирующих факторов естественного и искусственного характера, возникающих в среде их функционирования, включая единое информационное пространство (и киберпространство) диктует ужесточение требований по поддержанию техники средств связи и оборудования РТО в готовности к немедленному использованию по назначению, сокращению времени простоя и повышению оперативности выполнения мероприятий технического обеспечения связи и автоматизации. Нацеленность международных террористических группировок на объекты критической инфраструктуры [4] государства, а также размещение в непосредственной близости от границ России ракетных комплексов с малым полетным временем также требует поиска новых подходов и оперативных методов по поддержанию

готовности техники связи и РТО к применению в единой системе управления воздушным движением страны [1].

Одним из таких подходов, повышающим оперативность проведения мероприятий технической диагностики, и, в частности, контроля технического состояния, авторам видится во введении и обосновании понятийного аппарата «экспресс-контроля» технического состояния СТС.

В соответствии с ГОСТ 20911–89 Техническая диагностика. Термины и определения под экспресс-диагностированием понимается «диагностирование по ограниченному числу параметров за заранее установленное время». В тоже время, понятийный аппарат теории диагностики трактует диагностику, как «отрасль знаний, охватывающую теорию, методы и средства определения технического состояния объектов». При этом к задачам технического диагностирования относят<sup>1</sup>: контроль технического состояния (ТС), поиск места и определение причин отказа (неисправности), а также прогнозирование технического состояния.

Из приведенных задач (мероприятий) диагностики контроль ТС осуществляется практически на всех этапах ЖЦ технического изделия от производства до утилизации, в то время как поиск места отказа — только на этапах ремонтов, а прогнозирование ТС — на этапах проведения испытаний, технических обслуживаний и ремонтов [5]. В связи с этим, эксплуатанта СТС в большей степени интересует первая составляющая часть диагностики — контроль технического состояния объекта.

В научной литературе на сегодня термин «экспресс-контроль» (ЭК) технического состояния СТС как таковой отсутствует. Достаточно часто ЭК можно встретить в педагогике (при рассмотрении вопросов педагогического тестирования обучающихся), в медицине (где используется термин «экспресс-анализ» различных заболеваний), в экологии («экспресс-анализ» воды, воздуха, вредных выбросов, сточных вод и пр.), химии и микробиологии (микробиологический «экспресс-тест»), в экономике («экспресс-анализ» финансового состояния предприятия) и пр. В технических отраслях знаний термин «экспресс-контроль» встречается ограниченно в дорожном строительстве (при проверке качества и толщины укладки слоев дорожного покрытия), в геологии («экспресс-контроль» скважин), в сейсмологии («экспресс-анализ» сейсмических сигналов).

Однако, для СТС и, в частности, для аэродромного оборудования РТО и систем связи на сегодня в большей степени применяется термин «экспресс-диагностирование» (ЭД)<sup>1</sup>. В тоже время, введя определение данного понятия ЭД, законодатель не обозначил понятие «экспресс-

<sup>1</sup>ГОСТ 20911-89 Техническая диагностика. Термины и определения. М.: Издательство стандартов, 1990. 13 с.

контроль», как составной части процесса диагностики. Слово «экспресс» в данном словосочетании означает, прежде всего, повышение оперативности в проведении процедуры контроля ТС, а непосредственно «контроль» технического состояния — «проверку соответствия значений параметров объекта требованиям технической документации и определение на этой основе одного из заданных видов ТС в данный момент времени»<sup>1</sup>.

В свою очередь, для СТС различают такие виды контроля, как

*контроль готовности*, проводимый непосредственно перед использованием изделия по назначению или периодически в режимах ожидания использования, хранения или транспортирования с целью определения его готовности к решению функциональных задач;

*контроль функционирования*, осуществляемый при использовании изделия по назначению с целью своевременного обнаружения факта перехода его в неработоспособное состояние;

*контроль поисковый*, применяемый при восстановлении работоспособности изделия для определения места и характера отказа, обнаруженного контролем готовности и контролем функционирования.

Причем контроль готовности осуществляется, как правило, в процессе технического обслуживания (ТО) с оценкой ТС ОК на данный момент времени (на момент проведения ТО), а поисковый контроль — в процессе планового и внепланового (текущего) ремонта. В то же время, для эффективной эксплуатации СТС необходимо знание соответствия значений параметров ОК требуемым, а также его вида ТС в реальном масштабе времени, или близкому к нему, к примеру, работоспособность оборудования связи и РТО аэродромов (стартовых комплексов) в период обеспечения полетов (пусков). С данной точки зрения, для эксплуатанта СТС с высокой ценой отказа важно иметь оценки результатов *контроля функционального* в масштабе реального времени, с целью недопущения развития предаварийной ситуации в аварию и своевременного обнаружения факта изменения вида технического состояния ОК [7]. Особенно это критично для радиоэлектронного оборудования, функционирующего в автоматическом режиме на значительных удалениях от диспетчерского пункта управления (командно-диспетчерского пункта (КДП) аэродрома) без постоянного присутствия инженерно-технического персонала, способного своевременно предотвратить развитие предаварийной ситуации. В таких автономных, необслуживаемых (необитаемых или малообитаемых) системах и комплексах РТО необходимо наличие развитых встроенной подсистемы контроля и подсистемы дистанционного доведения до опе-

ратора (системы поддержки принятия решения — СППР) результатов контроля для оперативного управления техническим состоянием и предотвращения развития негативных событий, заключающихся в перерастании предотказного состояния, в неработоспособное или предельное [5, 7].

Обеспечение своевременного предотвращения развития аварийной ситуации возможно только проведением непрерывного либо периодического функционального контроля, что можно рассматривать по определению, соответственно, как мониторинг или контроллинг [2]. В то же время, проведение метрологических мероприятий полного (инструментального) контроля всех параметров изделия в соответствии с нормативно-технической документацией (НТД) либо сокращенного контроля ограниченного числа его параметров предусмотрено исключительно при проведении процедур *контроля готовности* (при различных видах ТО: ЕТО, ТО-1, ТО-2, предварительного ТО, предполетного ТО [8] и т.д.). В процессе же *контроля функционирования* ОК проведение постоянного мониторинга и периодического контроллинга *всех* эксплуатационных параметров неприемлемо с точки зрения огромных финансовых затрат и низкой оперативности цикла проведения (продолжительности) полного контроля, а также использования результатов такого контроля на фоне быстротечности развития аварии (отказа), в условиях случайных и намеренных воздействий [9].

Исходя из сказанного, необходим поиск новых способов проведения функционального контроля, удовлетворяющего всевозрастающим требованиям по оперативности мероприятий поддержания готовности техники связи и РТО к применению по назначению в различных внешних (дестабилизирующих факторы) и внутренних (режимы работы, старение техники и пр.) условиях функционирования.

Одним из подходов к проведению функционального контроля является предложенное выше понятие «экспресс-контроль», под которым в статье понимается *определение вида технического состояния объекта по ограниченному числу контролируемых параметров в реальном масштабе времени, или близкому к нему*.

Причем актуальными при формировании понятийного аппарата «экспресс-контроля» являются такие задачи как оптимальное распределение *перечня контролируемых параметров* ЭК на каждом объекте РТО для различных фаз полета воздушных судов (ВС) и летательных аппаратов (включая БПЛА) (взлет, посадка, движение по заданному маршруту полета и пр.), а также определение *продолжительности и периодичности* ЭК. Решение первой задачи должна обеспечить заданную достоверность контроля ТС при приемлемой длительности ЭК, а вторая — заданные ограничения по оперативности ЭК при еще приемлемой достоверности.

<sup>1</sup>ГОСТ 20911-89 Техническая диагностика. Термины и определения. М.:

Издательство стандартов, 1990. 13 с.





Помимо этого, проведение ЭК предполагает определение объемов проведения процедуры ЭК по автономным объектам территориально-распределенной системы связи и РТО в наибольшей степени влияющих на безопасность полетов и выполнения функциональных задач СТС, а также оптимизацию мест «наблюдения» (снятия измерительной информации — ИИ) или маршрутов облета при проведении летных проверок процедуры ЭК и др.

### Выбор параметров экспресс-контроля

При анализе показателей надежности СТС значительное внимание уделяется вопросам определения критичности блоков, узлов и агрегатов системы в общей схеме ее надежности. Проблема выявления критичных элементов особенно актуальна при анализе надежности функционирования и обеспечения безопасности систем (критичности цены отказа) в условиях ограниченных временных ресурсов. Поскольку системы содержат большое количество элементов, а деградационные процессы влияют на различные элементы по-разному, то в условиях жестко ограниченных ресурсов обеспечить повышение надежности путем улучшения качества одновременно всех элементов не представляется возможным. Также проведение полного инструментального контроля десятков и сотен эксплуатационных параметров СТС в короткий временной интервал без должного метрологического обеспечения и запаса временного ресурса, как было указано выше, невозможно. При этом возникает самостоятельная задача выбора перечня параметров контролируемого объекта для включения в процедуру ЭК через определение значимости (важности) того или иного элемента (устройства) в общей схеме надежности системы, а также вклада (веса) значения конкретного эксплуатационного параметра в коэффициент готовности СТС.

Выбор перечня параметров, включаемых в процедуру ЭК для конкретной технической системы индивидуален. Однако, в качестве общего подхода к их определению можно использовать коэффициент, характеризующий критичность и тяжесть последствий отказов СТС по причине выхода их за пределы требуемых значений, а также «вклад» того или иного параметра в повышение показателя надежности объекта контроля. Назовем такой коэффициент *коэффициентом значимости* —  $K_{\text{зн}}$ .

Примером определения важности (значимости) включения параметров из всего множества, входящих в НТД на СТС в процедуру ЭК может служить общий коэффициент значимости  $K_{\text{зн}i}^{\Sigma}$  параметра, получаемый как сумма назначенных весов показателей  $K_{\text{зн}}$  по лингвистической шкале оценки [10].

При этом суммарный коэффициент значимости  $K_{\text{зн}i}^{\Sigma}$ , влияющий на включение параметра в процедуру экспресс-контроля получается путем суммирования коэффициентов

значимости  $K_{\text{зн}}$  по каждому показателю лингвистической шкалы оценивания, как приведено в выражении (1)

$$K_{\text{зн}i}^{\Sigma} = \sum_{i=1}^n K_{\text{зн}i} \quad (1)$$

где  $n$  — общее число параметров, входящих в НТД объекта контроля.

Формирование лингвистической шкалы оценивания для каждого ОК (СТС) также строго индивидуально, см. табл. Обоснованный выбор показателей лингвистической шкалы, ее лингвистических переменных, а также пределов изменения коэффициента значимости  $K_{\text{зн}}$ , включаемых в процедуру ЭК ТС при контроле параметров СТС является весьма сложной задачей. Ее решение возможно с использованием системного подхода и методов экспертных оценок [11–13]. Это связано с тем, что любая СТС характеризуется большим числом существенных свойств, показателей качества и множеством эксплуатационных параметров, определяющих ее нормальное функционирование. При этом возможными методами, минимизирующими субъективизм при определении таких свойств, является экспертный метод [12] или метод аналогии, а выделенные свойства СТС, оцениваемые определенными параметрами составляют основу для формирования анкет, необходимых для проведения экспертной оценки.

Процесс экспертного опроса по выбору эксплуатационных параметров СТС для включения в процедуру ЭК должна включать следующие этапы:

- разработку вопросов анкеты (лингвистических переменных);
- определение состава экспертной группы (специалистов, способных дать компетентное заключение по работанным вопросам анкеты);
- непосредственная процедура опроса экспертов;
- машинная обработка результатов экспертного опроса.

Для формирования группы экспертов могут использоваться такие способы как: самооценка, взаимооценка, оценка эксперта рабочей группой, статистическая оценка, тестовая оценка, документальная и комбинированная оценка [13]. Так, для выбора эксплуатационных параметров, включаемых в процедуру ЭК оборудования РТО аэродрома, могут привлекаться специалисты группы управления полетами, офицеры боевого управления, и другие специалисты по различным подразделениям связи и РТО.

Операция ранжирования параметров, включаемых в процедуру ЭК может осуществляться на различных уровнях структурирования СТС, комплексов, стоек, агрегатов, узлов и отдельных элементов на основе анализа морфологических блоков и структурных взаимосвязей [14]. Чем больше весовой коэффициент элемента, тем он важнее для обеспечения надежного функционирования ОК и безопас-



Таблица

Лингвистическая шкала оценивания общего коэффициента значимости параметра, включаемого в процедуру экспресс-контроля

Показатели	Порядковые шкалы	$K_{зи}$
Тяжесть последствий	1. Отказ вызывает катастрофическую ситуацию.	1
	2. Отказ требует принятия экстренных мер по недопущению катастрофической ситуации.	0,8
	3. Отказ ведет к потере некоторых эксплуатационных свойств, сокращающих период эксплуатации.	0,6
	4. Отказ ведет к потере некоторых эксплуатационных свойств, не влияющих на период эксплуатации.	0,4
	5. Отказ меняет рабочие режимы зависимых элементов системы, что ведет к увеличению вероятности их отказов.	0,2
Резервирование	1. Резерв невозможен.	1
	2. Резерв возможен, но отсутствует.	0,8
	3. Однократный резерв, без контроля состояния резерва.	0,6
	4. Однократный резерв, состояние резерва контролируется.	0,4
	5. Двукратный и более резерв без контроля состояния резерва.	0,2
	6. Двукратный и более резерв, контроль состояния резерва есть.	0
Вероятность отказа	1. Элемент обладает относительно высокой вероятностью отказа в течение эксплуатации.	1
	2. Отказ считается возможным и вероятным (конструкция прошла достаточный объем испытаний, обеспечивающий приемлемый уровень вероятности безотказной работы).	0,8
	3. Отказ возможен, но маловероятен (отказов данного элемента на предшествующих аналогах не наблюдалось).	0,6
	4. Отказ возможен, но крайне маловероятен (при проектировании приняты меры для исключения отказа, обеспечен высокий показатель безотказности, достигнута стабильность характеристик, отсутствуют предельные температурные, радиационные, вибрационные нагрузки и т. д.).	0,4
	5. Отказ считается невозможным (отсутствуют логические условия для возникновения отказа).	0,2
Устойчивость к воздействию внешних неблагоприятных факторов	1. Из опыта эксплуатации известно, что в условиях воздействия внешних факторов ресурс меньше, чем проектный.	1
	2. Опыт эксплуатации при воздействиях внешних факторов отсутствует, но анализ предсказывает, что ресурс меньше проектного.	0,8
	3. Фактический ресурс в реальных условиях эксплуатации близок к проектному.	0,6
	4. Известно, что реальный ресурс больше проектного.	0,4
	5. Отсутствуют неблагоприятные факторы внешнего воздействия в период эксплуатации.	0,2
Контроль состояния элемента	1. Состояние элемента не контролируется.	1
	2. Предусмотрен контроль без прогнозирования	0,5
	3. Предусмотрен прогнозирующий контроль	0,1
Возможность локализации	1. Локализация нужна, но технически невозможна в конструкции.	1
	2. Предусмотрены меры к локализации отказа.	0,5
	3. Специальные меры к локализации отказа не нужны.	0,1

ности полетов. При этом окончательный перечень контролируемых в процессе ЭК параметров определяется путем построения вариационного ряда из значений суммарных коэффициентов значимости каждого  $i$ -го параметра  $K_{zn\ i}^{\Sigma}$  из перечня НТД ОК

$$K_{zn\ i}^{\Sigma} > K_{zn\ r}^{\Sigma} > K_{zn\ k}^{\Sigma} > K_{zn\ l}^{\Sigma} > K_{zn\ m}^{\Sigma} > K_{zn\ n}^{\Sigma} \dots, \quad (2)$$

где  $i = 1, 2, \dots, k, \dots, l, \dots, m, \dots, r, \dots, n-1, n$  — параметры НТД.

В перечень параметров, включенных в процедуру экспресс-контроля, попадают параметры с наибольшими значениями суммарных коэффициентов значимости в вариационном ряду (2). Их число зависит от глубины проведения ЭК, отводимого времени на ЭК, а также доступных технологий ЭК.

### Продолжительность проведения экспресс-контроля и его периодичность

Количество параметров для процедуры ЭК зависит от времени, отводимого на нее, возможностей средств метрологического обеспечения, контролепригодности СТС и ее элементов разукрупнения, а также применяемых технологий и инструментария. Так, например, проведение процедуры ЭК системы связи и РТО аэродрома при размещении средств метрологического обеспечения на воздушном судне-лаборатории (ВСЛ) (или других летательных аппаратах — ЛА) ограничено временем проведения специальной летной проверки в процессе облета района размещения оборудования РТО. При использовании беспилотного летательного аппарата (БПЛА) самолетного типа ЭК также ограничен как по времени облета (или нескольких циклов облета) района размещения технических средств РТО, так и по целевой нагрузке бортового метрологического оборудования. БПЛА квадрокоптерного типа имеют большой временной ресурс для качественного (точного) проведения измерений в ходе ЭК (за счет наблюдения за ОК из точки «зависания»), однако обладают худшими летно-подъемными характеристиками для размещения метрологического оборудования на борту, а, следовательно, число контролируемых параметров в процедуре ЭК меньше. Однако, при этом оперативность ЭК возрастает.

Говоря о периодичности проведения экспресс-контроля для его действенности (достоверности) и учета результатов контроля в СППР, к примеру, в АСУС и РТО должностных лиц группы управления полетами на аэродроме и пр., необходимо уйти от понятия отложенного времени (*of-line*), имеющегося на сегодняшний день, с периодичностью контроля должностными лицами (в соответствии с ведомственными руководящими документами)

при проведении контроля готовности, измеряемого месяцами, неделями и днями, к осуществлению процедуры ЭК в режиме реального времени (*on-line*) или близкого к нему (предполетные летные проверки и др.). При этом ЭК не должен подразумевать проведение *мониторинга* технического состояния (англ. *condition monitoring*) как составной части технического обслуживания, заключающейся в наблюдении за объектом с целью получения информации о его техническом состоянии и рабочих параметрах (проводимого в процессе работы объекта непрерывно или через запланированные интервалы времени)<sup>2</sup>, а также *контроллинга* (англ. *controlling*) — систематического контроля в виде отслеживания хода выполнения поставленных задач с одновременной коррекцией работы [2], имеющими несколько другие функции.

Экспресс-контроль нельзя сопоставить и с таким видом технического обслуживания как контрольный осмотр, проводимый, как правило, на отключенных технических средствах перед их включением, (перед выводом техники в полевой район, на марш (для авто- и бронетехники) или на коротких остановках на маршрутах движения), поскольку, ЭК предполагает проведение контрольных мероприятий в процессе функционирования ОК.

Таким образом, по времени проведения экспресс-контроль занимает промежуточное место между инструментальным контролем, проводимым в назначенное время в режиме *off-line* в период плановых технических обслуживаний (ЕТО, ТО-1, ТО-2, и др.) и постоянно проводимым мониторингом (или систематически проводимым контроллингом) в режиме *on-line*. На графике (рис. 1) экспресс-контроль размещен на границе этих двух режимов.

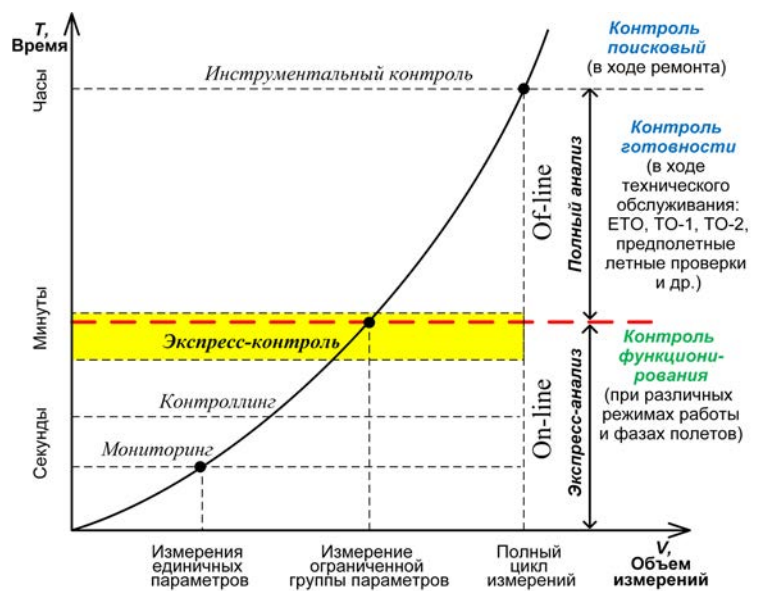


Рис. 1. Место экспресс-контроля ТС ОК в теории диагностики

<sup>2</sup>ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. 30 с..

Его всецело можно отнести к режиму, близкому к режиму реального времени.

Обозначив  $T_j$  как время, отводимое на измерение  $j$ -го параметра (равное времени проведения измерений в соответствии с технологической картой (ТК) НТД:  $T_j = t_{\text{ТК}j}^{\text{НТД}}$ ), включенного в процедуру ЭК ( $j = \overline{1, m}$ , где  $m$  число параметров ЭК,  $m \in [n]$ ), можно записать выражение для общего времени, отводимого на процедуру ЭК — ТЭК в виде выражения (3)

$$T_{\text{ЭК}}^{\Sigma} = \sum_{j=1}^m T_j + T_{\text{гот}}^{\text{СИ}}, \quad (3)$$

где  $T_{\text{гот}}^{\text{СИ}}$  — время готовности средств измерений к проведению ЭК, состоящего из времени, отводимого для запуска БПЛА с соответствующей полезной нагрузкой средств измерений (либо взлета ВСЛ), времени выбора и занятия (смены) точки (точек) «наблюдения» за объектами РТО (для БПЛА типа квадрокоптер) и соответствующего высотного эшелона для общего охвата района размещения оборудования РТО (установления радиоэлектронного контакта с наземным оборудованием), либо времени выхода в район барражирования или на маршрут облета объектов системы связи и РТО аэродрома (для БПЛА самолетного типа или ВСЛ).

Поскольку ведомственными руководящими документами для должностных лиц подразделений связи и РТО установлена периодичность проведения контрольных проверок оборудования РТО [5, 15], то периодичность проведения процедур (циклов) ЭК должна определяться в промежутках между первичными, периодическими, предполетными, контрольными и специальными летными проверками [8], как правило, при проведении полетов. Также процедуры ЭК необходимо осуществлять при существенных изменениях состояния среды функционирования ОК, огневых и радиоэлектронных (включая кибернетические) воздействиях противника, авариях на объектах контроля и их системах электроснабжения [16–18] и в других случаях по усмотрению руководителя полетов и должностных лиц по связи и РТО.

### Определение допусков на параметры объекта контроля

Повышение требований к надежности и качеству функционирования оборудования связи и РТО, делают особо актуальной проблему правильности назначения эксплуатационных допусков на параметры, входящих в них подсистем и элементов. Известные методы расчета допусков на параметры радиоэлектронных средств базируются на учете дестабилизирующих факторов, старения и технологического разброса параметров, но не учитывают корреляцию параметров ее элементов.

В настоящее время вид технического состояния средств связи и РТО в процессе ЭК определяется нахождением контролируемых параметров в пределах установленных интервалов допусков для конкретного типа оборудования. При этом основные виды ТС рассматриваются как финальные вероятности нахождения ОК в одном из возможных состояний [16]. Причем логика перехода из одного вида ТС в другой определяется вариационным рядом предпочтения. Поскольку вид ТС ОК обычно характеризуется не одним, а несколькими параметрами, и современные методы назначения допусков на параметры не учитывают их корреляцию (влияние) друг на друга, то для повышения достоверности контроля, возможно представить некоторую область в пространстве параметров, где с заданной вероятностью находятся значения контролируемых параметров ОК (т.е. при оценке ТС ОК вместо интервала  $[\theta_{i\min}, \theta_{i\max}]$  изменения одного параметра  $\Theta_i$  использовать область неопределенности). Размерность данной области определяется по количеству выходных параметров, по которым ведется оценка вида ТС [19]. Однако, поскольку при проведении измерений всегда присутствуют внешние возмущения и погрешности средств измерений, то указанная область неопределенности имеет размытые границы, перенося погрешность на значения контролируемых параметров.

Существующие методы параметрического синтеза сложных технических систем [20] рассчитаны на применение точное значений параметров, характеризующих ТС СТС или знание вероятностных характеристик дестабилизирующих воздействий, приводящих к погрешностям в оценке величин контролируемых параметров [21]. При этом одним из распространенных методов к исследованию неопределенных величин основан на применении вероятностного подхода, когда каждому вектору соотносится некоторое распределение вероятностей с заданной плотностью. Данный подход требует знания статистических характеристик исходных неопределенных факторов, что не всегда достижимо на практике.

При поиске оптимальной области неопределенности в ходе параметрического синтеза СТС (как динамического объекта) замена одного значения параметра ОК множеством его возможных значений обусловлена конечной точностью определения положения ОК при решении практических задач и четким определением допущений и ограничений для упрощения математической модели действующей системы [22–23]. При этом отображение заданной области неопределенности возможно как для двухпараметрического пространства (эллипс качества — на плоскости), так и для трехпараметрического (эллипсоид качества — в пространстве). Так применение эллипсоидов качества в пространстве параметров описано в таких ра-

ботах как [23–24]. В дальнейшем данные подходы развиты в [25–26], а для нелинейных систем в [27–28] и др.

В реально действующих СТС, таких как система связи и РТО аэродрома, неопределенности очень редко носят случайных или игровой характер, поэтому необходимо осуществлять выбор между вероятностным и гарантированным подходами, для чего гарантированный подход должен быть «близок» к вероятностному. А поскольку вероятностный подход, как правило, опирается на гауссовы распределения неопределенных величин, то наиболее приемлемым для решения задач обработки неточных измерений в ходе контроля технического состояния системы связи и РТО, как постоянно изменяющейся системы в условиях воздействий является метод эллипсоидов.

Рассмотрим систему связи и РТО как динамическую систему, элементы которой имеют показатели качества функционирования, зависящие от эксплуатационные параметров, меняющих свои значения как от внутренних состояний (режимов работы), так и от внешних воздействий (состояния среды функционирования). Аналитические зависимости показателей качества  $p$  от нестабильности эксплуатационных параметров радиоэлектронного оборудования системы связи и РТО  $\Theta$  с различными характеристиками  $\Xi$  среды функционирования  $p = f(\Theta, \Xi)$  предполагается непрерывной и, по крайней мере, дважды дифференцируемой по любому из параметров  $\Theta_j, j = \overline{1, m}$ . Другим предположением является то, что область работоспособности ОК ( $\lg p_{\text{доп}} - \lg p\Xi$ ) не превышает значения  $0,1 \lg p\Xi$  и зависимости  $\{p(\Theta_j)\}, j = \overline{1, m}$ . Тогда применив разложение Тейлора и ограничив получаемый ряд элементами с производной второго порядка, имеем:

$$p = f(\Theta, \Xi) = p_{\Xi} + \sum_j^m \frac{\partial p}{\partial \Theta_j} \Theta_j + 0,5 \sum_j^m \sum_i^m \frac{\partial^2 p}{\partial \Theta_j \partial \Theta_i} \Theta_j \Theta_i, \quad (3)$$

где  $p\Xi$  — вероятность ошибочного приема значения контролируемого параметра в связи с воздействиями среды функционирования  $\Xi$  при нахождении эксплуатационных параметров ОК в номинальных значениях, т. е. при  $\Theta = 0$ .

Для двухпараметрического описания контролируемого оборудования системы связи и РТО ( $m = 2$ ) геометрическое представление зависимости  $p = f(\Theta, \Xi)$  будет иметь вид трехмерной поверхности, как показано на рис. 2.

При установлении допуска на показатель качества функционирования оборудования связи и РТО рдоп поверхность  $p(\Theta_1, \Theta_2)$  пересекается плоскостью, параллельной плоскости параметров на уровне  $p = p_{\text{доп}}$  в сечении которой имеем эллипс, уравнение которого соответствует (3) при  $p = p_{\text{доп}}$ :

$$p_{\Xi} - p_{\text{доп}} + \sum_j^2 \frac{\partial p}{\partial \Theta_j} \Theta_j + 0,5 \sum_j^2 \sum_i^2 \frac{\partial^2 p}{\partial \Theta_j \partial \Theta_i} \Theta_j \Theta_i = 0. \quad (4)$$

Продифференцировав выражение (4) по  $\Theta_i$ , где  $i = 1, 2; i \neq j$ , и приравняв производную нулю, а также подставив найденный параметр  $\Theta_j$  в (4), получим уравнение эллипса относительно полуоси  $a_j$  [25]:  $\gamma_{ji} a_j^2 + \gamma_{ji} a_j + \gamma_{j0} = 0$  и решим его

$$a_j^{1,2} = \frac{(-\gamma_{ji} \pm \sqrt{\gamma_{ji}^2 - 4\gamma_{ji}\gamma_{j0}})}{2\gamma_{ji}}, \quad (5)$$

где  $\gamma_{jj} = B_j - \frac{B_i C_{ji}}{C_{ii}}; \gamma_{ji} = C_{jj} - \frac{C_{ji}^2}{C_{ii}}; 4B_j = \frac{\partial p}{\partial \Theta_j}; B_i = \frac{\partial p}{\partial \Theta_i};$

$$C_{jj} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 p}{\partial \Theta_j^2}; C_{ii} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 p}{\partial \Theta_i^2}; C_{ji} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 p}{\partial \Theta_j \partial \Theta_i}.$$

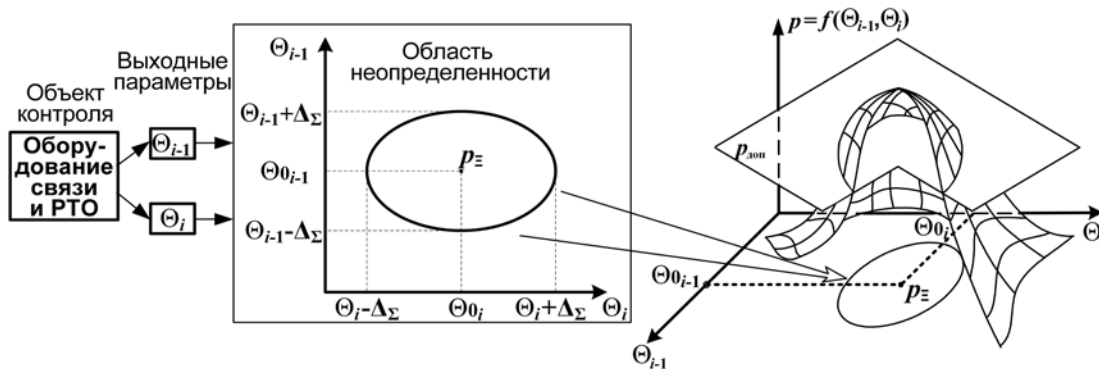
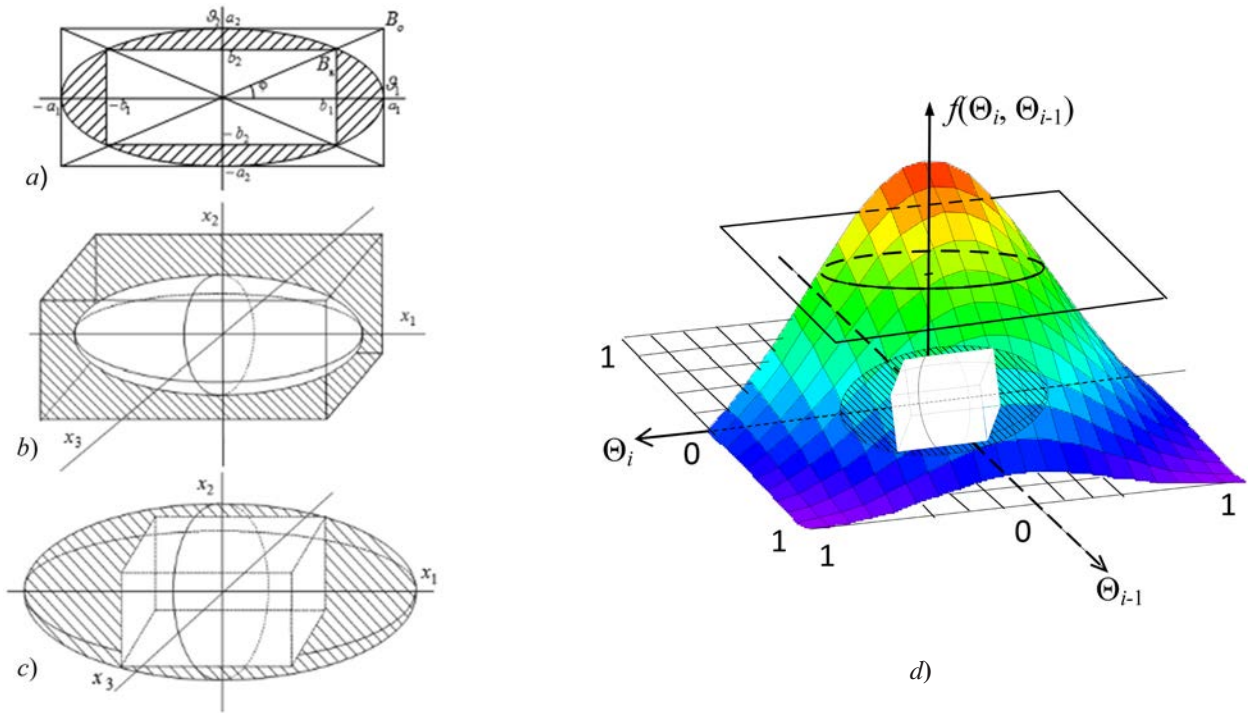


Рис. 2. Формирование области неопределенности при оценке ТС РЭО двумя выходными параметрами





**Рис. 3.** Эллипс качества — *a*, эллипсоид качества — *b*, *c* и тело неопределенности — *d* для двух и трех ( $m = 2, m = 3$ ) коррелированных параметров с учетом ошибок первого и второго рода

Выражения (5) определяют на плоскости параметров уравнение прямоугольника  $B_0$ , описанного вокруг эллипса, как показано на рис. 3а. В тоже время, значения величин  $\{a_j\}, j = 1, 2$ , рассчитанных по выражениям (5) не могут быть использованы в качестве допусков на параметры ОК, поскольку существует вероятность ошибки принятия решения о работоспособности оборудования РТО, когда оно неработоспособно. Данная вероятность соответствует заштрихованным сегментам между эллипсом и прямоугольником  $B_0$ , которая определяется по выражению

$\beta = \int_{\Theta \in \Delta a} W(\Theta | p > p_{\text{доп}}) d\Theta$ , где  $W(\Theta | p > p_{\text{доп}})$  — условная плотность распределения эксплуатационных параметров  $\Theta$  при значениях показателя качества контролируемого объекта выше рдоп;  $\Delta a$  — ограниченная прямоугольником  $B_0$  область значений параметров.

Для минимизации вероятности  $\beta$  следует допуски на эксплуатационные параметры  $\Theta$  задавать путем построения вписанного в эллипс качества прямоугольника со сторонами  $2b_1$  и  $2b_2$ , как показано на рис. 3а, но при этом возникает вероятность ошибки об определении неработоспособного состояния ОК, пропорциональная площади заштрихованной области на рис. 3а и определяемая как  $\alpha = \int_{\Theta \in \Delta b} W(\Theta | p \leq p_{\text{доп}}) d\Theta$ , где  $\Delta b$  — область значений параметров, ограниченная вписанным в эллипс качества прямоугольником  $B_b$  максимальной площади. Такая задача

минимизации вероятности  $\alpha$  решается в тригонометрии методом диагоналей [24], когда вершины вписанного прямоугольника  $B_b$  размещают в точках пересечения диагоналей описанного прямоугольника  $B_0$  с эллипсом качества, приведенному к виду

$$\frac{\Theta_1^2}{a_1^2} + \frac{\Theta_2^2}{a_2^2} = 1, \quad (6)$$

$$a_2/a_1 = b_2/b_1 = \text{tg}\varphi. \quad (7)$$

Для частного случая, при  $\Theta_1 = b_1$  и  $\Theta_2 = b_2$  определяются стороны вписанного прямоугольника  $B_b$ , соответствующие допускам на эксплуатационные параметры ОК при ошибке  $\beta = 0$  и минимальной ошибке  $\alpha$ .

Для общего случая, при  $m > 2$  (многопараметрический контроль), область работоспособности определяется границей гиперэллипсоида качества в виде [25],

$$\Theta_1/a_1 + \Theta_j/a_j + \dots + \Theta_m/a_m = 1, \quad (8)$$

с значениями полуосей  $a_j$  гиперэллипсоида качества, определяемые по (5), где

$$\gamma_{jj} = B_j - 0,5E_j^1 M_{jj}^{-1} L_j; \quad \gamma_{jj} = C_{jj} - L_j^1 M_{jj}^{-1} L_j \frac{C_{jj}^2}{C_{ii}};$$

$$\gamma_{j0} = p_{\Sigma} - p_{\text{доп}} - 0,25E_j^1 M_{jj}^{-1} L_j; \quad j, i = \overline{1, m};$$



$M_{jj}^{-1}$  — матрица, обратная  $M_{jj}$  с элементами  $C_{ij}$ ,  $i \neq j$ , в которой отсутствует  $j$ -й столбец и  $j$ -я строка;  $E_j$  — вектор с размерностью  $m$  и элементами  $B_i$ ;  $L_j$  —  $j$ -й столбец матрицы  $M_{jj}$  без  $j$ -й строки.

При этом значения величин допусков на параметры ОК  $\{\Theta_j\}$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$  равны половинам длин ребер гиперпараллелепипеда максимального объема, вписанного в гиперэллипсоид (8), т.е.  $\Theta_{\text{доп}} = b_j = a_j / \sqrt{m}$  (см. рис. 3б, с, d)

### Территориально-распределенное поле значений параметров качества динамической радиотехнической системы

Предложенный подход позволяет осуществлять назначение эксплуатационных и расчет профилактических допусков [31] на произвольное число выбранных параметров для включения в процедуру экспресс-контроля системы связи и РТО аэродрома.

Общи сложности к процедуре проведения ЭК заключаются в том, что система связи и РТО является открытой, распределенной, динамической, вероятностной и сложной аргатической (человеко-машинной) системой.

Сложность системы обусловлена наличием большого числа взаимодействующих элементов — технических

устройств (в большинстве своем функционирующих автономно и характеризующихся большим числом эксплуатационных параметров), обслуживающего и управляющего персонала, составляющих единое целое и обладающих существенными свойствами, отсутствующими у отдельных элементов. Действительно, только полностью развернутая и обслуживаемая система связи и РТО позволяет эффективно и безопасно управлять воздушным движением, в то время как ни один из элементов этой системы сам по себе такой возможности не обеспечивает.

Распределенность системы связи и РТО связана с тем, что ее элементы не локализованы, а территориально рассредоточены на большой площади.

Система связи и РТО является *открытой* по той причине, что она постоянно взаимодействует с окружающей средой, на нее может воздействовать не только случайные, но и преднамеренные факторы.

Внешняя среда, противник, различного рода внутренние отказы оказывают непрерывное дестабилизирующее влияние на состояние отдельных элементов системы. В результате ее состояние в целом непрерывно меняется, что и позволяет говорить о ней как о *динамической* системе.



Рис. 4. Вариант размещения наземного оборудования системы связи и РТО аэродрома

Поскольку при этом все события, связанные с изменением состояния системы связи и РТО, являются случайными, то ее следует рассматривать как *вероятностную*.

На рис. 4 приведен вариант размещения наземного оборудования системы связи и РТО аэродрома базирования авиационной части, а также доступные для проведения ЭК летно-подъемные средства.

Как было показано выше, для проведения ЭК в процессе функционирования системы связи и РТО возможно использовать воздушное судно-лабораторию и специально выделенные летательные аппараты, включая БПЛА самолетного и квадрокоптерного типа. В зависимости от типа летно-подъемного средства, а соответственно, размещаемого на нем метрологического оборудования зависят такие характеристики как объем проводимых измерений (число контролируемых параметров), глубина контроля, время проведения, его периодичность и пр.

В случае размещения бортовых комплексов ЭК на других летательных аппаратах (ЛА) ВВС, помимо ВСЛ и БПЛА (как показано на рис. 4), оперативность ведения ЭК будет доведена до непрерывного наблюдения (мониторинга) за качеством функционирования системы связи и РТО аэродрома, поскольку каждый ЛА при взлете, посадке, движении в район применения авиации и нахождении над районом дислокации аэродрома, способен будет осуществлять процедуру ЭК всего территориально-распределенного поля значений параметров качества динамической системы связи и РТО (рис. 5).

В данном случае ИИ, получаемую бортовым комплексом ЭК доводить до наземного комплекса (специалистам группы управления полетами) целесообразно исключительно только в случае выхода контролируемых параметров за пределы установленных допусков, не перегружая каналы управления воздушным движением. Как видно на рис. 5, одно из средств связи, размещаемое на командно-диспетчерском пункте функционирует с отклонением параметров от требований НТД с выходом за пределы допусков.

При этом сигналы телесигнализации о нарушении нормального функционирования ОК (средств связи и РТО), полученные от нескольких ЛА значительно повысят достоверность экспресс-контроля, без задействования дополнительных средств обеспечения ЭК (ВСЛ, БПЛА) доводя его оперативность до режима реального времени (*on-line*).

Для поддержания системы связи и РТО в высокой готовности к применению по назначению требуется поиск новых методов автоматизированного дистанционного ЭК и технологий обработки его результатов, позволяющих повысить эффективность функционального контроля по излучаемым параметрам средств связи и РТО. Необходимо проведение НИОКР, направленных на создание программно-аппаратных комплексов дистанционного (неразрушающего) контроля, а также методик и алгоритмов оперативной обработки большого объема ИИ, получаемой от отдельных ОК, либо всего территориально-распределенного поля значений параметров качества динамической системы связи и РТО.

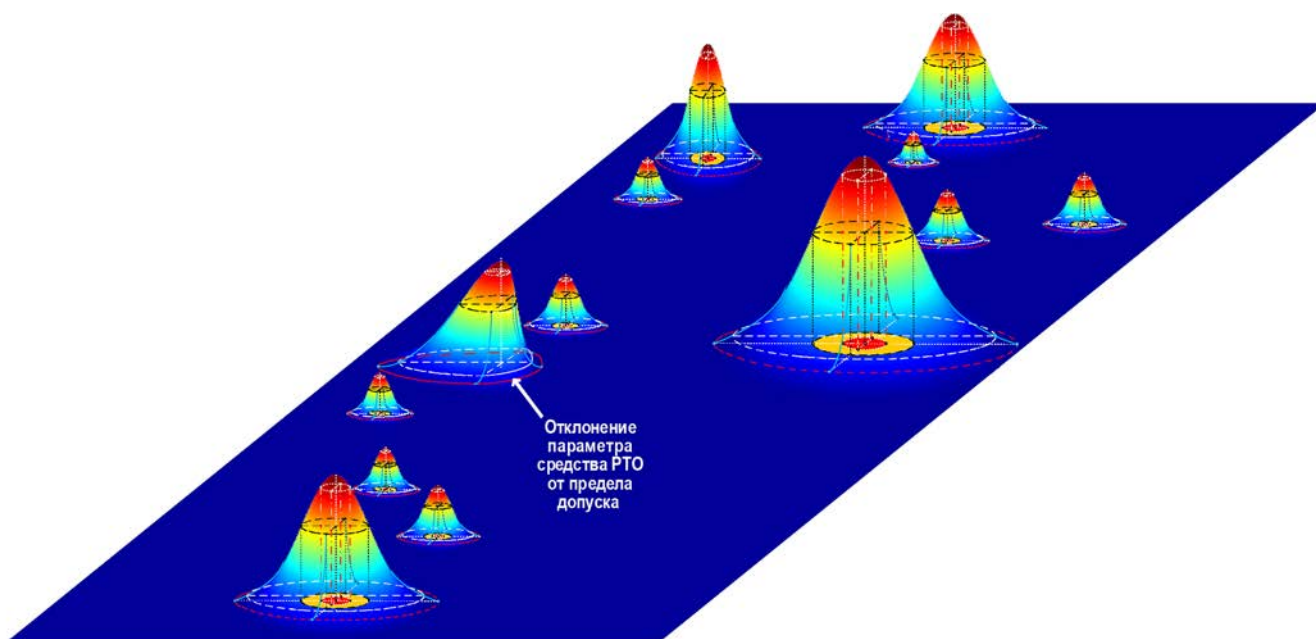


Рис. 5. Территориально-распределенное поле значений параметров качества динамической радиотехнической системы



### Общие принципы организации и проведения экспресс-контроля

Исходя из изложенного понятийного аппарата экспресс-контроля можно сформулировать основные принципы его организации и проведения:

1. *Принцип технической совместимости.* Подсистема ЭК должна базироваться на способах неразрушающего контроля и обеспечивать техническую совместимость со средствами и методами контроля, реализованными в объектах контроля.

2. *Принцип автоматизации.* Процессы контроля, сбора, обработки измерительной информации о техническом состоянии объектов контроля, а также доведения ее должностным лицам (лицу, принимающего решение) должна быть автоматическими (автоматизированными).

3. *Принцип гибкости архитектуры.* Подсистема ЭК на основе методологии открытых систем, должна обеспечивать возможность своей реконфигурации (адаптации) в условиях дестабилизирующих факторов, быстрой реакции на изменение состояния ее элементов и внешней среды, а также наращивания функций контроля технического состояния автономных объектов и их элементов в территориально-распределенном пространстве.

4. *Принцип безизбыточности.* Подсистема ЭК должна обеспечивать минимальные потери целевой информации, обладающей минимальной избыточностью, при этом выдавать сигнал тревоги оператору только в случае выхода параметра за пределы эксплуатационного или профилактического допуска.

5. *Принцип эргономичности и дружелюбности интерфейса.* Подсистема ЭК должна иметь необходимые формы (звуковые, световые, цифровые) выдачи сигналов предупреждения об отказе, а также возможности отображения, регистрации и документирования результатов контроля (формирования отчетов).

6. *Принцип взаимодействия.* Подсистема ЭК должна взаимодействовать с другими подсистемами контроля готовности, контроля функционирования и прогнозного контроля через непрерывно формируемый массив данных (базу состояний объектов контроля, в том числе распределенную базу данных) усиливать синергетический эффект достоверности информации, используемой при принятии решений в условиях нештатных ситуаций, снижения качества телекоммуникационных ресурсов (каналов) или срыве информационного обмена, сводя к минимуму вероятность ошибок при выработке управляющих воздействий.

7. *Принцип прогноза.* Подсистема ЭК должна иметь возможность функционирования в прогнозирующем режиме, разделяя аварийные сообщения по приоритету: критические (отказ системы) и предаварийные (предупредительные), выявляя возникновения предотказной ситуации.

### Заключение

В работе обосновывается понятийный аппарат процедуры проведения экспресс-контроля для сложных технических систем на примере системы связи и РТО аэродрома. Представлен подход к выбору параметров экспресс-контроля на основе метода экспертных оценок, а также продолжительности его проведения и периодичности.

Рассматривая систему связи и РТО как открытую, распределенную, динамическую, вероятностную и сложную систему, предложено в ее подсистеме ЭК наряду с эксплуатационными допусками на контролируемые параметры использовать также и профилактические допуски, адаптируемые к внутренним и внешним условиям функционирования системы.

Сформулированные общие принципы организации и проведения ЭК в системном аспекте рассматривают процедуру его осуществления с общих позиций, независимо от применяемых технологий [30–33].

Направлениями дальнейших исследований является формирование научно-методического аппарата проведения экспресс-контроля, а также построение эффективных алгоритмов экспресс-анализа измерительной информации и обмена ею в едином информационном пространстве с привлечением инструментария, основанного на применении таких методов как самообучающиеся нейронные сети, вейвлет-анализ [34], обработка больших данных и др.

### Литература

1. Бондарь Д.С., Прохоров А.В. Анализ показателей надежности аэродромных систем управления воздушным движением // Научный вестник МГТУ ГА. 2016. Т. 19. № 5. С. 118–122.
2. Макаренко С.И. Краткий справочник научных терминов и обозначений. СПб.: Научное издание технологий, 2019. 241 с.
3. Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Ковалев А.В. и др. Неразрушающий контроль и диагностика / Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2003. 656 с.
4. Макаренко С.И. Аудит безопасности критической инфраструктуры специальными информационными воздействиями. Монография. СПб.: Научное издание технологий, 2018. 122 с.
5. Чихачев А.В., Третьяков С.М., Бурлаков А.А., Бариннов М.А., Морозов Р.В. Техническое обеспечение связи и автоматизации. СПб.: Изд-во ВАС, 2018. 302 с.
6. Винограденко А.М., Веселовский А.П., Бурьянов О.Н. Оперативный контроль технического состояния электротехнических объектов // Сборник статей III Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники» (Санкт-Петербург, 14–15 декабря 2016 г.). СПб.: Арт-Экспресс, 2016. С. 178–184.
7. Винограденко А.М., Будко П.А., Юров А.С., Литвинов А.И. Способ мониторинга предаварийного состояния контролируемых объектов // Датчики и системы. 2014. № 9 (184). С. 8–14.



8. Данилин М. А., Жмылев Р. В. Особенности оценки технического состояния техники связи и радиотехнического обеспечения полетов // Труды IV Межвузовской научно-практической конференции «Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях» (Санкт-Петербург, 06 февраля 2019 г.). СПб.: Изд-во ВАС, 2019. Т. 2. С. 237–240.
9. Макаренко С. И. Информационное оружие в технической сфере: терминология, классификация, примеры // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 3. С. 292–376. URL: <http://scs.intelgr.com/archive/2016-03/11-Makarenko.pdf> (дата обращения 29.10.2019).
10. Клюев В. В. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. М.: Машиностроение, 1986. 488 с.
11. Будко П. А., Рисман О. В. Многоуровневый синтез информационно-телекоммуникационных систем. Математические модели и методы оптимизации: Монография. СПб.: Изд-во ВАС, 2011. 476 с.
12. Бешелев С. Д., Гуревич Ф. Г. Математико-статистические методы экспертных оценок. М.: Статистика, 1980. 263 с.
13. Легков К. Е., Буренин А. Н., Емельянов А. В. Основные показатели качества функционирования информационных подсистем автоматизированных систем управления сложными организационно-техническими объектами // Информация и космос. 2017. № 2. С. 58–64.
14. Лопаткин В. И. Методы неразрушающего контроля за рубежом // Проблемы безопасности полетов. 1986. № 6. С. 58–65.
15. Федеральные авиационные правила «Радиотехническое обеспечение полетов воздушных судов и авиационная электро-связь в гражданской авиации» Утв. приказом Министерства транспорта РФ от 20 октября 2014 г. № 297. // Гарант. URL: <https://base.garant.ru/70812462/> (дата обращения 29.10.2019)
16. Будко П. А., Будко Н. П., Винограденко А. М., Литвинов А. И. Реализация кинетического метода контроля и диагностики технических средств // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 8 (162). С. 37–44.
17. Будко П. А., Литвинов А. И. Бесконтактный контроль и идентификация технического состояния электрооборудования систем электроснабжения промышленных комплексов // Датчики и системы. 2014. № 8 (183). С. 5–10.
18. Патент РФ 2548602. Способ и устройство автоматического контроля технического состояния электрооборудования / Будко Н. П., Будко П. А., Винограденко А. М., Литвинов А. И. Заявл. 19.02.2014. Оpubл. 20.04.2015. Бюл. № 11. 24 с.
19. Будко П. А., Винограденко А. М., Гойденко В. К., Кузнецов С. В. Реализация метода многоуровневого комплексного контроля технического состояния морского робототехнического комплекса // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 4. С. 71–101.
20. Abramov O. V. Choosing Optimal Values of Tuning Parameters for Technical Devices and Systems // Automation and Remote Control. 2016. Vol. 77. No. 4. Pp. 594–603.
21. Borgonovo E. A new uncertainty importance measure // Reliability Engineering & System Safety. 2007. Vol. 6 (92). Pp. 771–784.
22. Акуленко Л. Д., Шматков А. М. Оптимальное по воздействию приведение динамического объекта на поверхность эллипсоида в многомерном пространстве // Доклады Академии наук. 2017. Т. 477. № 1. С. 29–33.
23. Евланов Л. Г. Контроль динамических систем. Москва. Наука. 1979. 432 с.
24. Абрамов О. В., Здор В. В., Суноня А. А. Допуски и номиналы систем управления. М.: Наука, 1976. 160 с.
25. Abramov O. V., Nazarov D. A. Condition-based maintenance by minimax criteria. Applied Mathematics in Engineering and Reliability // Proceedings of the 1st International Conference on Applied Mathematics in Engineering and Reliability (Ho Chi Minh City, Vietnam, 4–6 May 2016). CRC Press, 2016. Pp. 91–94.
26. Винограденко А. М. Эллипсоидальная аппроксимация областей параметрической неопределенности технического состояния робототехнического комплекса // Робототехника и техническая кибернетика. 2018. № 3 (20). С. 53–60.
27. Филиппова Т. Ф. Дифференциальные уравнения эллипсоидальных оценок множеств достижимости нелинейной динамической управляемой системы // Труды Института математики и механики УрО РАН. 2010. Т. 16. № 1. С. 223–232.
28. Filippova T. F., Berezina E. V. On state estimation approaches for uncertain dynamical systems with quadratic nonlinearity: theory and computer simulations // Lecture Notes in Computer Science. 2008. Vol. 4818. Pp. 326–333.
29. Абрамов О. В. Планирование профилактических коррекций параметров технических устройств и систем // Информатика и системы управления. 2017. № 3(53). С. 55–66.
30. Будко П. А., Фомин Л. А., Гайчук Д. В. Принципы организации и планирования сетей // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2003. Т. 6. № 5. С. 87–90.
31. Будко П. А., Чихачев А. В., Баринов М. А., Винограденко А. М. Принципы организации и планирования сильносвязной телекоммуникационной среды сил специального назначения // Т-Сопм: Телекоммуникации и транспорт. 2013. Т. 7. № 6. С. 8–12.
32. Будко П. А., Линец Г. И., Мухин А. В., Фомин Л. А. Эффективность, цена и качество информационно-телекоммуникационных систем. Методы оптимизации: Монография. СПб.: Изд-во ВАС, 2011. 420 с.
33. Будко П. А. Управление ресурсами информационно-телекоммуникационных систем Методы оптимизации: Монография. СПб.: Изд-во ВАС, 2012. 512 с.
34. Будко П. А., Жуков Г. А., Винограденко А. М., Гойденко В. К. Определение аварийного состояния морского робототехнического комплекса по многоэтапной процедуре контроля на основе использования вейвлет-преобразований // Морская радиоэлектроника. 2016. № 4 (58). С. 20–23.



## TO THE QUESTION OF SUBSTANTIATION OF THE CONCEPTUAL APPARATUS NONDESTRUCTIVE EXPRESS CONTROL OF TECHNICAL CONDITION EQUIPMENT OF COMMUNICATION SYSTEM AND AERODROME RADIO ENGINEERING SUPPORT

**ALEKSEY M. VINOGRADENKO,**

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

**ALEKSEY V. MEZHENOV,**

St. Petersburg, Russia, a.mezhenov@yandex.ru

**NIKITA P. BUDKO,**

St. Petersburg, Russia, budko62@mail.ru

**KEYWORDS:** express diagnosis; express control; technical condition monitoring; parameters; operating tolerances; preventive tolerances; monitoring duration.

### ABSTRACT

The work is devoted to the search for new methods of diagnostics and justification of the "express control" conceptual apparatus of the state of complex technical systems with a high price of failure. The relevance of the study is caused by the fact that the concept of express diagnostics is defined in the state standards, but the essence of its component such as express monitoring is not disclosed, which in the work it is proposed to understand the definition of technical condition type of the object according to a limited number of controlled parameters in real time, or close to it. An approach to the selection of parameters included in the express control procedure based on the method of expert assessments, as well as its duration and periodicity is presented. General principles of organization and carrying out of express control in the system aspect are formulated, considering the procedure of its implementation from the common positions, regardless of the applied technologies. In the operation, the process of express inspection is disclosed on the example of diagnostics of the communication system and radio support of the airfield with presentation of the construction variant of the geographically distributed field of parameters values of quality of the inspection object obtained using non-destructive testing methods using accessible flight-lifting facilities. At the same time type of technical condition of communication and radio-technical support in the process of express monitoring is determined by finding of monitored parameters within the limits of established tolerance intervals for a specific type of radio-electronic equipment. Considering the communication and radio support system as an open, distributed, dynamic, probabilistic and complex system, it is proposed in the express control subsystem, along with operational tolerances for controlled parameters, to use preventive tolerances adapted to the internal and external conditions of the system. At the same time, the procedure for determining preventive tolerances is carried out both using the classical approach, for two-parameter space, and depending on the number of included operational parameters in the express control procedure - for multi-parameter space of control objects.

### REFERENCES

1. Bondar' D.S., Prohorov A.V. Analysis of indicators reliability for airfield systems air traffic control. *Nauchnyj vestnik MGTU GA* [Civil Aviation High Technologies]. 2016. Vol. 19. No. 5. Pp. 118-122. (In Russian)
2. Makarenko S.I. Spravochnik nauchnyh terminov i oboznachenij [Handbook of scientific terms and designations]. St. Petersburg: Naukoemkie Tekhnologii, 2019. 254 p. (In Russian)

3. Klyuev V.V., Sosnin F.R., Kovalev A.V. et al. *Nerazrushayushchij kontrol' i diagnostika* [Nondestructive control and diagnostics]. By ed. V.V. Klyueva. Moscow: Mashinostroenie, 2003. 656 p. (In Russian)
4. Makarenko S.I. *Audit bezopasnosti kriticheskoj infrastruktury specialnymi informacionnymi vozdeystviyami. Monografiya* [Security audit of critical infrastructure with special information impacts. Monograph]. St. Petersburg: Naukoemkie Tekhnologii, 2018. 122 p. (In Russian)
5. Chihachev A.V., Tret'yakov S.M., Burlakov A.A., Barinov M.A., Morozov R.V. *Tekhnicheskoe obespechenie svyazi i avtomatizacii* [Technical support of communication and automation]. St. Petersburg: Voennaya akademiya svyazi Publ., 2018. 302 p. (In Russian)
6. Vinogradenko A.M., Veselovskij A.P., Bur'yanov O.N. Operativnyj kontrol' tekhnicheskogo sostoyaniya elektrotekhnicheskikh ob'ektov [Operational control of the technical condition of electrical facilities]. *Sbornik statej III Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Sovremennye problemy sozdaniya i `ekspluatacii vooruzheniya, voennoj i special'noj tehniki"* [Proc. of III of the All-Russia scientific and practical conference "Modern problems of creation and operation of arms, military and special equipment", St. Petersburg, on December 14-15, 2016]. St. Petersburg, 2016. Pp. 178-184. (In Russian)
7. Vinogradenko A.M., Budko P.A., Yurov A.S., Litvinov A.I. Way of the monitoring conditions close to emergency controlled object. *Datchiki & Systemi* [Sensors & Systems]. 2014. No. 9 (184). Pp. 8-14. (In Russian)
8. Danilin M.A., Zhmylev R.V. Osobennosti ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya tekhniki svyazi i radiotekhnicheskogo obespecheniya poletov [Features of assessment of technical condition of communication equipment and radio technical support of flights]. *Trudy IV Mezhvuzovskoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Problemy tekhnicheskogo obespecheniya vojsk v sovremennyh usloviyah"* [Proc. of IV of Interuniversity scientific and practical conference "Problems of technical providing armies in modern conditions", St. Petersburg, on February 06, 2019]. St. Petersburg, 2019. Vol. 2. Pp. 237-240. (In Russian)
9. Makarenko S.I. Information Weapon in Technical Area – Terminology, Classification and Examples. *Systems of Control, Communication and Security*. 2016. No. 3. Pp. 292-376. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2016-03/11-Makarenko.pdf> (date of access 29.10.2019) (In Russian)
10. Klyuev V.V. *Pribory dlya nerazrushayushchego kontrolya materialov i izdelij* [Devices for non-destructive testing of materials and products]. Moscow: Mashinostroenie, 1986. 488 p. (In Russian)



11. Budko P.A., Risman O.V. *Mnogourovnevnyj sintez informacionno-telekommunikacionnyh sistem. Matematicheskie modeli i metody optimizacii: Monografiya* [Multilevel synthesis of information and telecommunication systems. Mathematical models and optimization methods: Monograph]. St. Petersburg: Voennaya akademiya svyazi Publ., 2011. 476 p. (In Russian)
12. Beshelev S.D., Gurevich F.G. *Matematiko-statisticheskie metody ekspertnyh ocenok* [Mathematical and statistical methods of expert assessments]. Moscow: Statistika, 1980. 263 p. (In Russian)
13. Legkov K.E., Burenin A.N., Emelyanov A.V. The Main indicators of the quality of functioning of information subsystems of automated control systems of complex organizational and technical objects. *Information and Space*. 2017. No. 2. Pp. 58–64. (In Russian)
14. Lopatkin V.I. *Metody nerazrushayushchego kontrolya za rubezhom* [Methods of nondestructive control abroad]. *Problemy bezopasnosti poletov* [Problems of flight safety]. 1986. No. 6. Pp. 58–65. (In Russian)
15. Federal'nye aviacionnye pravila "Radiotekhnicheskoe obespechenie poletov vozdushnyh sudov i aviacionnaya elektrosvyaz' v grazhdanskoj aviacii" [Federal aviation regulations "Radio engineering support of aircraft flights and aviation telecommunication in civil aviation]. Garant – informacionno-pravovoj portal [The guarantor – an information and legal portal]. URL: <https://base.garant.ru/70812462/> (date of access 29.10.2019) (In Russian)
16. Budko P.A., Budko N.P., Vinogradenko A.M., Litvinov A.I. Realization of the Kinetic Control Method and Diagnostics of Technical Means. *Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control]. 2014. No. 8 (162). Pp. 37–44. (In Russian)
17. Budko P.A., Litvinov A.I. Contactless control and identification of technical condition of electrical equipment of power supply systems of industrial complexes. *Datchiki & Systemy* [Sensors & Systems]. 2014. No. 8 (183). Pp. 5–10. (In Russian)
18. Patent 2548602 Sposob i ustrojstvo avtomaticheskogo kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya elektrooborudovaniya [Method and device of automatic control of technical condition of electrical equipment]. Budko N.P., Budko P.A., Vinogradenko A.M., Litvinov A.I. Declared 19.02.2014. Published 20.04.2015. Bulletin No. 11. 24 p. (In Russian)
19. Budko P.A., Vinogradenko A.M., Goydenko V.K., Kuznetsov S.V. Realization of a Method of Multilevel Complex Control of Technical Condition of a Sea Robot. *Systems of Control, Communication and Security*. 2017. No. 4. Pp. 71–101. (In Russian)
20. Abramov O.V. Choosing Optimal Values of Tuning Parameters for Technical Devices and Systems. *Automation and Remote Control*. 2016. Vol. 77. No. 4. Pp. 594–603.
21. Borgonovo E. A new uncertainty importance measure. *Reliability Engineering & System Safety*. 2007. Vol. 6 (92). Pp. 771–784.
22. Akulenko L.D., Shmatkov A.M. A time-optimal setting of a dynamic object on an ellipsoid surface in multidimensional space. *Doklady Physics*. 2017. Vol. 62. No. 11. Pp. 503–506.
23. Evlanov L.G. *Kontrol' dinamicheskikh sistem* [Control of dynamic systems]. Moscow: Nauka, 1979. 432 p. (In Russian)
24. Abramov O.V., Zdor V.V., Suponya A.A. *Dopuski i nominaly sistem upravleniya* [Tolerances and ratings of control systems]. Moscow: Nauka, 1976. 160 p. (In Russian)
25. Abramov O.V., Nazarov D.A. Condition-based maintenance by minimax criteria. *Applied Mathematics in Engineering and Reliability. Proceedings of the 1st International Conference on Applied Mathematics in Engineering and Reliability, Ho Chi Minh City, Vietnam, 4–6 May 2016*. CRC Press, 2016. Pp. 91–94.
26. Vinogradenko A.M. Ellipsoidal approximation for areas of parametrical uncertainty of technical conditions of robotic complex. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and technical Cybernetics]. 2018. No. 3 (20). Pp. 53–60. (In Russian)
27. Filippova T.F. Construction of set-valued estimates of reachable sets for some nonlinear dynamical systems with impulsive control. *Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics*. 2010. Vol. 269. No. 1. Pp.95–102.
28. Filippova T.F., Berezina E.V. On state estimation approaches for uncertain dynamical systems with quadratic nonlinearity: theory and computer simulations. *Lecture Notes in Computer Science*. 2008. Vol. 4818. Pp. 326–333.
29. Abramov O.V. Planning of preventive corrections of parameters of technical devices and systems. *Information Science and Control Systems*. 2017. No. 3(53). Pp. 55–66. (In Russian)
30. Budko P.A., Fomin L.A., Gajchuk D.V. Principles of Organization and Planning of Networks. *Physics of wave processes and radio engineering systems*. 2003. Vol. 6. No. 5. Pp. 87–90. (In Russian)
31. Budko P.A., Chihachev A.V., Barinov M.A., Vinogradenko A.M. Principles of the organization and planning of strongly connected telecommunication environment of forces of a special purpose. *T-Comm*. 2013. Vol. 7. No. 6. Pp. 8–12. (In Russian)
32. Budko P.A., Linec G.I., Muhin A.V., Fomin L.A. *Effektivnost', cena i kachestvo informacionno-telekommunikacionnyh sistem. Metody optimizacii* [Efficiency, price and quality of information and telecommunication systems. Optimization methods: Monograph]. St. Petersburg: Voennaya akademiya svyazi Publ., 2011. 420 p.
33. Budko P.A. *Upravlenie resursami informacionno-telekommunikacionnyh sistem Metody optimizacii* [Resource Management of information and telecommunication systems optimization Methods: Monograph]. St. Petersburg: Voennaya akademiya svyazi Publ., 2012. 512 p. (In Russian)
34. Budko P.A., Zhukov G.A., Vinogradenko A.M., Gojdenko V.K. Detection of an accident conditions of the marine robotic complex (system) according to the multi-stage control procedure on the basis of wavelet transform application. *Morskaya radioelektronika* [Marine Radioelectronics]. 2016. No. 4. (58). Pp. 20–23. (In Russian)

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Vinogradenko A.M., PhD, Docent, Doctoral Candidate Military academy of communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny;  
 Mezhenov A.V., Postgraduate at the Department of Military academy of communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny;  
 Budko N. P., Applicant at the Department of Military academy of communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny.

**For citation:** Vinogradenko A.M., Mezhenov A.V., Budko N.P. To the question of substantiation of the conceptual apparatus nondestructive express control of technical condition equipment of communication system and aerodrome radio engineering support. *H&ES Research*. 2019. Vol. 11. No. 6. Pp. 30–44. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10293 (In Russian)



doi: 10.24411/2409-5419-2018-10294

# ВЕРИФИКАЦИЯ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА СИМУЛЯЦИИ ДВОИЧНЫХ СЛУЧАЙНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ С ЗАДАННЫМИ СТАТИСТИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

**БАРАНОВ**

**Владимир Александрович<sup>1</sup>**

**КОНЫШЕВ**

**Михаил Юрьевич<sup>2</sup>**

**ПРИВАЛОВ**

**Андрей Андреевич<sup>3</sup>**

**ШЕСТАКОВ**

**Александр Викторович<sup>4</sup>**

**АННОТАЦИЯ**

В работе рассматривается проблема получения набора выборок для оценки качества криптографических алгоритмов на основе использования статистических тестов. Описаны новые свойства двоичных цепей Маркова, учитывающие зависимости вероятностей двоичных векторов различной длины. Предложены аналитические выражения, позволяющие вычислить зависимости пределов диапазонов значений вероятностей многомерных двоичных случайных величин от вероятностей двоичных случайных величин меньшей размерности. Определены причины необходимости дополнительной процедуры «отбраковки» при симуляции реализаций двоичных марковских процессов. Рассмотрен метод направленного перебора значений вероятностей рядов распределений марковских двоичных последовательностей, позволяющий генерировать эргодические двоичные случайные последовательности, что позволяет полностью отказаться от процедуры «отбраковки». Представлен реализующий указанный метод алгоритм, обладающий пониженной вычислительной сложностью по сравнению с известными алгоритмами организации вычислительного эксперимента по исследованию статистических свойств двоичных случайных последовательностей. В настоящее время одним из обязательных этапов верификации криптографических алгоритмов является их тестирование с использованием множеств двоичных последовательностей, выступающих в роли шифруемых сообщений. Суть указанного этапа заключается в проверке результатов шифрования указанных сообщений на основе статистических тестов на случайность, например, тестов NIST. Современные подходы к решению задачи формирования множества двоичных последовательностей основаны на методе статистических испытаний (Монте-Карло). При этом значительное распространение на практике получили 2 варианта метода. Первый вариант заключается в случайном выборе двоичных последовательностей из заранее сформированного множества. Второй вариант основан на формировании двоичных последовательностей с использованием математического аппарата сложных цепей Маркова, позволяющего наиболее полно описывать статистические свойства двоичных последовательностей, и метода обратной функции, обеспечивающего симуляцию двоичных последовательностей за счет преобразования равномерного распределения в требуемое путем задания соответствующего отображения.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** статистические тесты, цепи Маркова; двоичные последовательности; моделирование; вероятности двоичных векторов; дискретная случайная величина.

**Сведения об авторах:**

<sup>1</sup>д.т.н., доцент, профессор Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации, г. Орел, Россия, baranov.va@mail.ru

<sup>2</sup>к.т.н., доцент, профессор Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации, г. Орел, Россия, misha-kon@mail.ru

<sup>3</sup>д.в.н., профессор, профессор Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Россия, aprivalov@inbox.ru

<sup>4</sup>д.т.н., с.н.с., проректор по научной работе Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А.Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург, Россия, alexander.shestakov01@yandex.ru

**Для цитирования:** Баранов В.А., Коньшев М.Ю., Привалов А.А., Шестаков А.В. Верификация криптографических алгоритмов на основе использования метода симуляции двоичных случайных последовательностей с заданными статистическими свойствами // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 6. С. 45–52. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10294

### 1. Общие положения, термины и обозначения

В настоящее время одним из обязательных этапов верификации криптографических алгоритмов является их тестирование с использованием множеств двоичных последовательностей (ДСП), выступающих в роли шифруемых сообщений [1]. Суть указанного этапа заключается в проверке результатов шифрования указанных сообщений на основе статистических тестов на случайность, например, тестов NIST [2–3].

Современные подходы к решению задачи формирования множества ДСП основаны на методе статистических испытаний (Монте-Карло) [4]. При этом значительное распространение на практике получили 2 варианта метода. Первый вариант заключается в случайном выборе ДСП из заранее сформированного множества. Второй вариант основан на формировании ДСП с использованием математического аппарата сложных цепей Маркова (ЦМ) [5], позволяющего наиболее полно описывать статистические свойства ДСП, и метода обратной функции [6], обеспечивающего симуляцию ДСП за счет преобразования равномерного распределения в требуемое путем задания соответствующего отображения.

К настоящему времени наиболее изученными являются свойства равновероятных или равномерно распределенных, согласно терминологии фундаментальной работы [7], ДСП. Это вызвано, во-первых, исключительной ролью равномерно распределенных ДСП в криптографии, а во-вторых — возможностью получения на их основе ДСП с требуемым рядом распределения двоичных векторов. При этом, очевидно, что вариант формирования множества ДСП для верификации криптографических алгоритмов на основе ЦМ, привлекательнее с точки зрения обеспечения возможностей по управлению качеством результатов вычислительного эксперимента. Рассмотрим особенности реализации указанного метода.

При использовании ЦМ отображение задается в виде матрицы переходных вероятностей (МПВ). В отличие от задач симуляции одномерных распределений, особенностью симуляции ДСП на основе ЦМ является векторный характер получаемых распределений. Задача моделирования случайных векторов, элементы которых представляют собой различные случайные величины, рассмотрена в [8]. При этом моделирование требует указания совместного распределения нескольких случайных величин. В настоящей работе рассматривается другой случай, в котором все элементы векторов различной длины характеризуют одну ДСВ.

Иными словами, в зависимости от заданной связности двоичной ЦМ, требуется определить ряд распределения двоичных комбинаций соответствующей длины. Затем на основе информации относительно значений вероятностей двоичных комбинаций несложно вычислить значения

элементов МПВ цепи, требующихся для организации процесса симуляции ДСП.

Однако, при проведении вычислительных экспериментов, значения вероятностей двоичных векторов, составляющих в совокупности ряды распределений, симулируемых ДСП, как правило, априорно неизвестны. Соответствующие численные значения требуется получать на основе некоторой исходной информации, характеризующей исследуемый случайный процесс при низкой степени его агрегирования.

Кроме того, в ряде случаев при моделировании двоичных векторов задание МПВ не приводит к требуемому результату. Иными словами, использование некоторой совокупности значений МПВ симулирует ДСП с рядом распределения, не соответствующим требуемому. Известные результаты теории марковских процессов не позволяют объяснить природу такого явления, но относят симулируемый процесс к так называемым неэргодическим.

Проблема наличия неэргодических марковских процессов усугубляется отсутствием условий эргодичности для класса двоичных марковских процессов, выполнение которых можно проверить до начала процесса симуляции, что значительно усложняет организацию вычислительных экспериментов при верификации криптографических алгоритмов. Фактически, единственно возможным решением в этих условиях является организация эксперимента с обязательным включением в него дополнительной процедуры «отбраковки» ДСП, оказавшихся неэргодическими. Отбраковку несложно реализовать, например, на основе сравнения значений элементов МПВ, использованных при симуляции и вычисленных по ДСП, полученным в результате симуляции. Очевидно, такой подход избыточен с точки зрения затрачиваемых на реализацию вычислительных экспериментов временных и вычислительных ресурсов.

Следовательно, вопросы, связанные с формированием исходного набора ДСП, преобразуемых с использованием криптографических алгоритмов, недостаточно развиты с точки зрения организации направленного перебора значений рядов распределений двоичных векторов в ДСП. Значительный шаг в этом направлении сделан в работе [9], в которой предложен метод симуляции ДСП с заданными статистическими свойствами. Настоящая работа посвящена вопросам минимизации количества испытаний при исследовании качества криптографических алгоритмов на основе симуляции ДСП с заданными статистическими свойствами.

### 2. Формальная постановка задачи

#### Исходные данные:

$P(0)$  — вероятность события «0»,  $P(0) \in [0, 1]$ ;

$v$  — «масштаб распределения» — длина двоичных векторов, для которых рассчитываются вероятности векторов, где  $v \in \mathbb{Z}$ ,  $v \geq 2$ ;



$L_i$  — количество интервалов значений вероятностей на масштабе  $i$ , где  $i \in \mathbb{Z}$ ,  $i \geq 2$ ,  $L_v \geq \mathbb{Z}$ ,  $L_v \geq 2$ ;  
 $n$  — номер варианта, где  $n \in \mathbb{Z}$ ,  $n \in [0, N)$ .

Требуется разработать алгоритм расчёта значений вероятностей ряда распределения многомерных двоичных векторов, свободный от недостатков, связанных с необходимостью реализации процедуры «отбраковки» ДСП, обеспечивающий возможность направленного перебора статистических свойств, симулируемых ДСП, варьирования точностью их описания и пониженной вычислительной сложностью.

### 3. Свойства двоичных цепей Маркова, учитывающие зависимости вероятностей двоичных векторов различной длины

Рассмотрим множества двоичных последовательностей различной длины  $i$  с целью определения взаимосвязей вероятностей двоичных векторов различной длины. Соответствующая древовидная структура, узлами которой являются двоичные векторы, представлена на рис. 1. Каждый узел обозначен двумерным индексом, где первый индекс  $i$  — длина вектора, а второй индекс — десятичное значение двоичного вектора.

Очевидно, что значение вероятности двоичных векторов, исходя из определения полной группы событий, определяется выражениями

$$p(x_1, x_2, \dots, x_v) = p(x_1, x_2, \dots, x_v, x_{v+1}) + p(x_1, x_2, \dots, x_v, \bar{x}_{v+1}), \quad (1)$$

$$p(x_1, x_2, \dots, x_v) = p(x_0, x_1, x_2, \dots, x_v) + p(\bar{x}_0, x_1, x_2, \dots, x_v). \quad (2)$$

Тогда, учитывая номера позиций двоичных комбинаций в множествах комбинаций длины, элемент модели на рис. 1 с индексом  $(i, j)$  можно представить выражениями

$$p_{i-1, j} = p_{i, 2j} + p_{i, 2j+1} \quad (3)$$

$$p_{i-1, j} = p_{i, j} + p_{i, i+2^i} \quad (4)$$

Преобразование (3) и (4) с учетом введения номера четверки  $k$  позволили получить систему уравнений вида

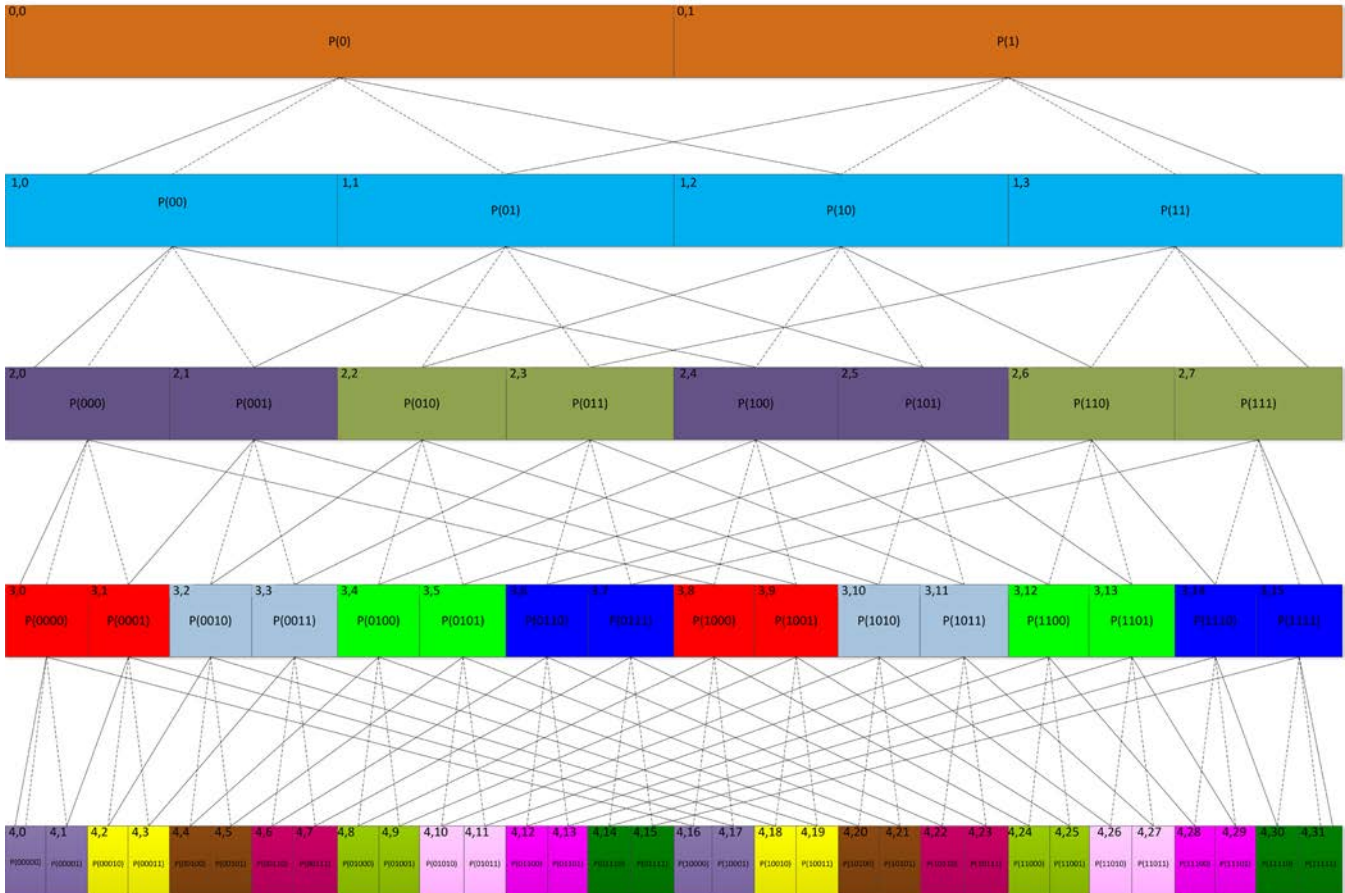


Рис. 1. Древовидная структура взаимосвязей вероятностей двоичных векторов различной длины



$$\begin{cases} p_{i-1,k} = p_{i,2k} + p_{i,2k+1} \\ p_{i-1,2k} = p_{i,2k} + p_{i,2k+2^i} \\ p_{i-1,2k-1} = p_{i,2k+1} + p_{i,2k+1+2^i} \\ p_{i-1,k+2^{i-1}} = p_{i,2k+2^i} + p_{i,2k+1+2^i} \end{cases} \quad (5)$$

Анализ значений индексов, определяющих значения двоичных векторов показывает, что вероятности векторов, длина которых различается на единицу, образуют изолированные четверки. Таким образом, изменение значения вероятности любого двоичного вектора некоторой четверки оказывает влияние только на вероятности векторов этой четверки.

Решение системы (5) позволяет определить минимальные и максимальные значения вероятностей двоичных комбинаций длины  $i$ , исходя из значений свободных членов системы (5). Так, максимальные значения слагаемых уравнений системы (5) определяются выражениями

$$\max p_{i,2k} = \min [p_{i-1,k}; p_{i-1,2k}], \quad (6)$$

$$\max p_{i,2k+1} = \min [p_{i-1,k}; p_{i-1,2k+1}], \quad (7)$$

$$\max p_{i,2k+1^{i-1}} = \min [p_{i-1,2k}; p_{i-1,k+2^{i-1}}], \quad (8)$$

$$\max p_{i,2k+1+2^i} = \min [p_{i-1,2k+1}; p_{i-1,k+2^{i-1}}]. \quad (9)$$

Минимальные значения слагаемых уравнений системы (5) определяются выражениями

$$\begin{aligned} \min p_{i,2k} &= p_{i-1,k} - \max p_{i,2k+1} = \\ &= p_{i-1,k} - \min [p_{i-1,k}; p_{i-1,2k+1}]. \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \min p_{i,2k+1} &= p_{i-1,k} - \max p_{i,2k} = \\ &= p_{i-1,k} - \min [p_{i-1,k+1}; p_{i-1,2k}], \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \min p_{i,2k+2^i} &= p_{i-1,2k} - \max p_{i,2k} = \\ &= p_{i-1,2k} - \min [p_{i-1,k}; p_{i-1,2k}], \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \min p_{i,2k+1+2^i} &= p_{i-1,k+2^{i-1}} - \max p_{i,2k+2^i} = \\ &= p_{i-1,k+2^{i-1}} - \min [p_{i-1,2k}; p_{i-1,k+2^{i-1}}]. \end{aligned} \quad (13)$$

Геометрически полученные зависимости удобно представить в виде трёх кругов, относительное расположение которых соответствует рис. 2. При этом углы секторов нижнего и верхнего кругов определяются парами

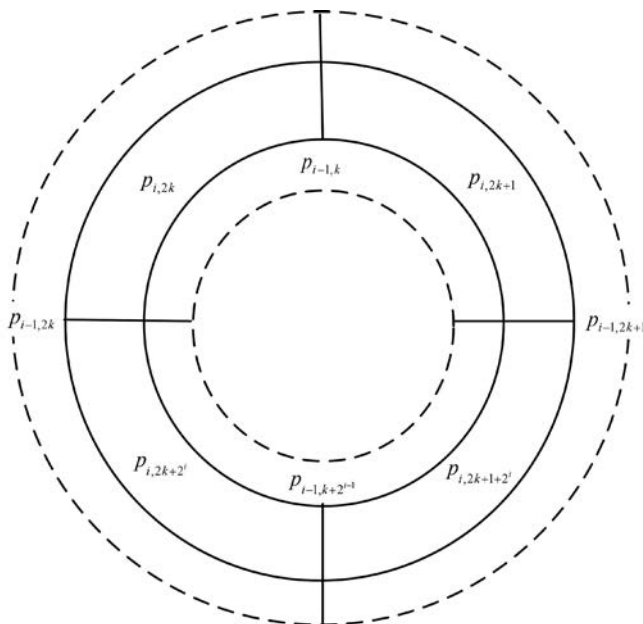


Рис. 2. Геометрическая интерпретация взаимосвязи значений вероятностей двоичных векторов, определяющих элементы четверок



значений свободных членов уравнений, а углы секторов среднего круга — четырьмя значениями слагаемых в правых частях уравнений, входящих в (5).

Наличие информации относительно значений вероятностей векторов меньшей размерности позволяет судить о диапазонах изменений вероятностей векторов большей размерности.

Указанное обстоятельство позволило разработать новый метод направленного перебора рядов распределений в задачах моделирования ДСП, отличающийся от известного учетом ограничений на диапазоны значений вероятностей многомерных ДСВ, определяемых значениями вероятностей многомерных ДСВ меньшей размерности. Преимуществом метода является отсутствие необходимости осуществления операций, реализующих процесс отбраковки ДСП, для которых не выполняются требования к точности воспроизведения статистических свойств ДСП.

#### 4. Алгоритм расчёта значений ряда распределения многомерных двоичных векторов

Разработанный метод реализуется алгоритмом, блок-схема которого представлена на рис. 3. Рассмотрим особенности указанного алгоритма.

Результатом работы алгоритма является множество значений вероятностей двоичных векторов длины  $v$ . Номер варианта  $n$  определяет ряд распределения вероятностей масштаба  $v$  и выражается через десятичное представление многомерного числа, описывающего параметры ряда распределения. Количество разрядов указанного многомерного числа соответствует количеству четверок на всех масштабах и определяется выражением  $N' = \sum_{i=2}^v 2^{i-2}$ .

Каждый разряд  $n_j$  задается в системе счисления по основанию  $L_{(j)}$ , где  $f(i) = 2 + \lfloor \log_2(j+1) \rfloor$ ,  $j = 0 \dots N' - 1$ , и определяет относительное положение значения вероятности ДСВ

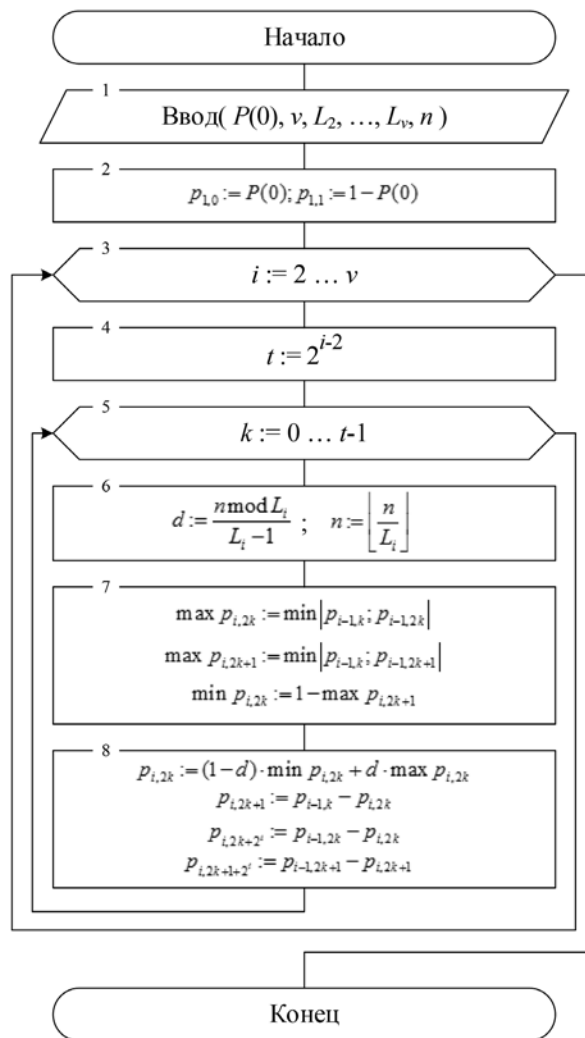


Рис. 3. Алгоритм расчёта значений вероятностей ряда распределения многомерных двоичных векторов на основании значения одномерной случайной величины и номера варианта

в интервале от его минимального до максимального значения для каждой четверки. Десятичное значение варианта  $n$  определяется выражением

$$n = n_0 + \sum_{j=1}^{N^d-1} n_j \cdot \prod_{i=2}^v L_{f(i)}, \quad (14)$$

а количество возможных вариантов — выражением

$$N = \prod_{i=2}^v (L_i)^{2^{i-2}}. \quad (15)$$

Рассмотрим функциональное назначение блоков алгоритма.

Блок 2 определяет начальные значения вероятностей ДСВ на первом масштабе.

В блоках 3–8 производится расчет вероятностей ДСВ на различных масштабах  $i$ , где  $i = 2 \dots v$ .

Количество различных комбинаций двоичных векторов длины  $i$  составляет величину  $2^i$ . На каждом масштабе распределения все вероятности векторов  $p_{i,m}$  длины  $i$  можно разбить на  $t$  непересекающихся групп по четыре элемента, где  $m=0 \dots 2^i - 1$ . Количество таких групп  $t = \frac{2^i}{4} = 2^{i-2}$  рассчитывается в блоке 4.

Каждая «четверка» обрабатывается независимо друг от друга. Для обработки всех «четверок» вводится цикл (блоки 5–8) с параметром  $k=0 \dots t-1$ , определяющим номер «четверки».

В блоке 6 производится выделение младшего разряда из варианта  $n$  с последующим получением относительной позиции в интервале  $[0,1]$  для текущей обрабатываемой четверки в соответствии с выражением

$$d = \frac{n \bmod L_i}{L_i - 1}, \quad (16)$$

и удаление младшего разряда за счет сдвига числа  $n$  вправо на один разряд

$$n = \left\lfloor \frac{n}{L_i} \right\rfloor. \quad (17)$$

Блок 7 предназначен для расчета минимального и максимального значения первого элемента обрабатываемой четверки в соответствии с выражениями (6), (7), (10).

В блоке 8 производится расчет значений финальных вероятностей для текущей обрабатываемой четверки в соответствии с выражениями

$$p_{i,2k} = (1-d) \cdot \min p_{i,2k} + d \cdot \max p_{i,2k}$$

$$p_{i,2k+1} = p_{i-1,k} - p_{i,2k}$$

$$p_{i,2k+2i} = p_{i-1,2k} - p_{i,2k}$$

$$p_{i,2k+1+2i} = p_{i-1,2k+1} - p_{i,2k+1}$$

После обработки всех «четверок» текущего масштаба  $i$  получаем вероятности всех векторов длины  $i$  ( $p_{i,m}$ ,  $m = 0 \dots (2^i - 1)$ ).

Результатом выполнения всех итераций цикла по  $i$  являются искомые (финальные) значения вероятностей векторов длины  $v$ .

### 5. Вычислительная сложность алгоритма

Каждый шаг цикла (блоки 6–8) требует 8 операций сложения/вычитания и 2 операции умножения (будем считать, что операция  $\min$  требует одной операции вычитания, а формулы в блоке 6 в расчете вычислительной сложности не учитываются).

Каждый шаг цикла «обрабатывает» одну «четверку». На масштабе  $v$  количество «четверок» есть величина  $2^{i-2}$ . Количество «четверок», обрабатываемых на всех масштабах до  $i=v$  есть величина  $\sum_{i=2}^v 2^{i-2} = 2^{v-1} - 1$ . Следовательно, количество операций сложения/вычитания для представленного алгоритма есть величина  $8 \cdot (2^{v-1} - 1)$ , т.е. сложность алгоритма  $O(v) = 2^{v-1}$ .

Количество всех вариантов рассматриваемых рядов распределений есть величина

$$N = \prod_{i=2}^v (L_i)^{2^{i-2}}.$$

Пусть все значения  $L_i=L$ , тогда

$$N = \prod_{i=2}^v L^{2^{i-2}} = L^{2^{v-1}-1}.$$

Следовательно вычислительная сложность алгоритма полного перебора рядов распределений масштаба  $k$  с количеством интервалов значений вероятностей в каждой «четверке»  $L$  определяется выражением

$$O(v, L) = 2^{v-1} \cdot L^{2^{v-1}-1}.$$

### 6. Выводы

Разработанный алгоритм обеспечивает возможность варьирования точностью описания статистических свойств ДСП посредством наличия параметров, описывающих связность ЦМ (максимальный масштаб) и количество интервалов значений вероятностей в группах на каждом масштабе.



Проведенный сравнительный анализ вычислительной сложности известного алгоритма организации вычислительного эксперимента по исследованию статистических свойств ДСП в системах и разработанного алгоритма, реализующего представленный в работе метод, позволил сделать вывод о том, что разработанный алгоритм обладает пониженной вычислительной сложностью при обеспечении выполнения заданных требований к точности воспроизведения статистических свойств, симулируемых ДСП.

Для исследования вопросов по определению требований к генераторам ДСП с равномерным законом распределения, используемым в процедуре симуляции марковских ДСП, необходимо проведение дополнительных (желательно совместных с Вьетнамскими коллегами) исследований.

### Литература

1. Фомичёв В. М. Методы дискретной математики в криптологии. М.: Диалог-МИФИ, 2010. 424 с.
2. Gustafson H., Dawson E., Nielsen L., Caelli W. A computer package for measuring strength of encryption algorithms // Computers & Security. 1994. Vol. 13. No. 8. Pp. 687–697.

3. Ritter T. Randomness Tests and Related Topics. URL: <http://www.ciphersbyritter.com/RES/RANDTEST.HTM> (дата обращения 12.10.2019).

4. Бусленко Н. П., Шрейдер Ю. А. Метод статистических испытаний (Монте-Карло) и его реализация на цифровых вычислительных машинах. М.: Физматгиз, 1961. 226 с.

5. Баруча-Рид А. Т. Элементы теории марковских процессов и их приложения: пер с англ. М.: Наука. 1969. 512 с.

6. Ермаков С. М. Статистическое моделирование. Часть 1. Моделирование распределений. СПб.: Изд-во СПбГУ НИИМиМ им. Смирнова, 2006. 63 с.

7. Кейперс Л., Нидеррейтер Г. Равномерное распределение последовательностей: пер с англ. М.: Наука, 1985. 408 с.

8. Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем. М.: Юрайт, 2012. 343 с.

9. Беляев Д. Л., Близнюк В. И., Иванов В. А., Коньшев М. Ю., Харченко С. В. Метод направленного перебора рядов распределений в задачах моделирования марковских двоичных последовательностей // Промышленные АСУ и контроллеры. 2015. № 5. С. 47–51.

## VERIFICATION OF CRYPTOGRAPHIC ALGORITHMS BASED ON THE USE OF METHOD SIMULATION BINARY RANDOM SEQUENCES WITH SPECIFIED STATISTICAL PROPERTIES

**VLADIMIR A. BARANOV**

Orel, Russia, baranov.va@mail.ru

**MIHAIL Y. KONYSHEV**

Orel, Russia, misha-kon@mail.ru

**ANDREY A. PRIVALOV**

St. Petersburg, Russia, aprivalov@inbox.ru

**ALEXANDR V. SHESTAKOV**

St. Petersburg, Russia, alexander.shestakov01@yandex.ru

**KEYWORDS:** statistical tests, the Markov chain; binary sequence; modeling; the probability of binary vectors; discrete random variable.

### ABSTRACT

The problem of obtaining a set of samples to evaluate the quality of cryptographic algorithms through the use of statistical tests. Describes new features of binary Markov chains, taking into account the dependence of the probability of binary vectors of different lengths. The analytical expressions for the limits calculated according to rang-

es of values of binary probabilities of multidimensional random variables on the probability of binary random variables smaller dimension. The reasons of the need for additional "reject" procedure in the simulation implementations binary Markov processes. The method of directed enumeration values of probability distributions Markov



ranks binary sequences, allowing to generate ergodic random binary sequence that allows to completely abandon the "rejection" procedure. Presented algorithm implementing said method having reduced computational complexity compared to known algorithms. Computing experiment to study the statistical properties of random binary sequences.

#### REFERENCES

1. Fomichev V.M. *Metody diskretnoj matematiki v kriptologii* [Methods of discrete mathematics in cryptology]. Moscow: Dialog-MIFI, 2010. 424 p.
2. Gustafson H., Dawson E., Nielsen L., Caelli W. A computer package for measuring strength of encryption algorithms. *Computers & Security*. 1994. Vol. 13. No. 8. Pp. 687-697.
3. Ritter T. Randomness Tests and Related Topics. URL: <http://www.ciphersbyritter.com/RES/RANDTEST.HTM> (date of access 12.10.2019).
4. Buslenko N.P., Shreider U.A. *Metod statisticheskikh ispytaniy (Monte-Karlo) i ego realizatsiya na tsifrovyykh vychislitel'nykh mashinakh* [A method of statistical tests (Monte-Carlo) and its implementation on digital computers]. Moscow: Fizmatgiz, 1961. 226 p.
5. Bharucha-Reid A.T. *Elements of the Theory of Markov Processes and Their Applications*. New York: McGraw Hill, 1960. 512 p.
6. Ermakov S.M. *Statisticheskoe modelirovanie. Chast' 1. Modelirovanie raspredelenij* [Statistical modeling. Part 1. Modeling of distributions]. Saint-Petersberg: SPGTU Publ., 2006. 63 p.
7. Kuipers L., Wiederreiter H. *Uniform distribution of sequences*. New York: J. Wiley, 1974. 390 p.
8. Sovetov B. Ya., Yakovlev S.A. *Modelirovanie sistem* [Modeling of systems]. Moscow: Yurayt, 2012. 343 p.
9. Belyaev D.L., Bliznyuk V.I., Ivanov V.A., Konyshchev M. Yu., Kharchenko S.V. The method of directed search of distribution series for the binary markov's chains simulation tasks. *Industrial Automatic Control Systems and Controllers*. 2015. No. 5. Pp. 47-51.

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Baranov V.A., PhD, Docent, Professor of the Russian Federation Security Guard Service Federal Academy;  
 Konyshchev M.Y., PhD, Docent, Professor of the Russian Federation Security Guard Service Federal Academy;  
 Privalov A.A., PhD, Full Professor, Professor of the Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University;  
 Shestakov A.V., PhD, Senior Researcher, Vice-rector for research of The Bonch-Bruевич State University of Telecommunications.

**For citation:** Baranov V.A., Konyshchev M.Y., Privalov A.A., Shestakov A.V. Verification of cryptographic algorithms based on the use of method simulation binary random sequences with specified statistical properties. *H&ES Research*. 2019. Vol. 11. No. 6. Pp. 45-52. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10294 (In Russian)





doi: 10.24411/2409-5419-2018-10295

# ФОРМАЛИЗОВАННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ОПЕРАЦИЙ НАСТРОЙКИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ РЕМОНТНОЙ ИНФОРМАЦИИ

**КИРИЧЕНКО****Сергей Иванович<sup>1</sup>****КУРЧИДИС****Виктор Александрович<sup>2</sup>****АННОТАЦИЯ**

Рассматривается процесс настройки радиоэлектронной аппаратуры при текущем ремонте сложных технических комплексов. Показано, что характерной чертой процесса настройки при восстановлении является общая неопределенность выполняемых действий и их порядка, следствием чего являются существенные временные затраты на обеспечение обслуживающего персонала ремонтной информацией. Этим обосновывается необходимость развития средств автоматизации информационной поддержки за счет создания формализованного концептуального представления процесса ремонта на основе семантических структур. Процесс настройки аппаратуры представляется последовательностью действий, связанных с поиском разрегулированных элементов, действий с регулировочными органами для установки требуемых значений параметров и оценкой результата проведения настройки. При формализации представления такого процесса используется многоаспектный подход, в котором учитываются структурный, деятельностный (процессный) и временной аспекты. В качестве семантических структур для такого представления используются фреймы и семантические шаблоны. Структурный аспект отражает элементный состав настроек радиоэлектронной аппаратуры и представляется на основе фреймов. Представление процессного и временного аспектов осуществляется на основе семантических шаблонов. Построение таких семантических структур связывается с анализом предметной области и выделением самостоятельных понятийных единиц – сущностей и отношений между ними. Приводятся правила и примеры построения фреймов и семантических шаблонов для отдельных действий и операций настройки. Полная совокупность фреймов и семантических шаблонов определяет предлагаемое формализованное представление процесса настройки радиоэлектронной аппаратуры. Особенность предлагаемого представления состоит в том, что оно образует единую модель, которая определяет процесс настройки в виде формальной системы в предметных понятиях и терминах, выражаемых на естественном языке. Использование такой модели способствует развитию средств автоматизации информационной поддержки обслуживающего персонала и имеет целью уменьшение времени, затрачиваемого на выполнение текущего ремонта радиоэлектронной аппаратуры.

**Сведения об авторах:**

<sup>1</sup>адъюнкт Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны, г. Ярославль, Россия, ynzha@yandex.ru

<sup>2</sup>д.т.н., профессор, профессор Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны, г. Ярославль, Россия, idahmer2@yandex.ru

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** информационная поддержка; восстановление; текущий ремонт; время ремонта; радиоэлектронная аппаратура.

**Для цитирования:** Кириченко С.И., Курчидис В.А. Формализованное представление операций настройки радиоэлектронной аппаратуры для формирования ремонтной информации // Научно-технические исследования в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 6. С. 53–60. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10295

## Введение

В процессе эксплуатации изделия радиоэлектронной аппаратуры сложных технических комплексов (РЭА СТК) подвергаются воздействию внутренних и внешних негативных факторов, приводящих к деградации и нарушению функционирования аппаратуры — возникновению отказов [1]. Восстановление работоспособного состояния аппаратуры после отказов осуществляется в процессе текущего ремонта. Время текущего ремонта РЭА после отказов имеет определяющее значение для обеспечения высокой готовности изделий к применению по назначению [2].

Одним из признаков возникновения отказа радиоэлектронной аппаратуры является выход одного или нескольких параметров за пределы допуска. Такая ситуация может возникнуть по двум причинам:

- аппаратурный (структурный) отказ узла или блока вследствие необратимых изменений элементов изделия;
- параметрический отказ — разрегулировка и расстройка элементов изделия вследствие обратимых изменений элементов изделия [3].

Если в первом случае восстановление работоспособного состояния изделия осуществляется заменой неисправных элементов заведомо исправными или восстановлением неисправных элементов, то во втором случае проводятся настройка и регулировка [6]. Настройка и регулировка РЭА при выполнении текущего ремонта РЭА СТК характеризуется высокой трудоемкостью и значительными временными затратами, что негативно влияет на общее время восстановления технических комплексов после отказов.

Следует отметить, что настройка/регулировка радиоэлектронной аппаратуры сложных технических комплексов проводится не только при восстановлении после отказов, но также в рамках технического обслуживания [4]. При выполнении технического обслуживания СТК порядок проведения настроек радиоэлектронной аппаратуры подробно регламентирован в соответствующих разделах эксплуатационной документации, количество и последовательность выполняемых действий строго определены. При этом работы по настройке и регулировке, предусмотренные эксплуатационной документацией, выполняются полностью без сокращений и изменений.

В отличие от технического обслуживания, характерной чертой процесса настройки при восстановлении является общая неопределенность выполняемых действий и их порядка [5]. В некоторых частных случаях эта неопределенность снимается ремонтной документацией, создаваемой для простых типовых неисправностей. В общем случае регламентирующая документация для проведения ремонта РЭА СТК отсутствует, так что получение обслуживающим персоналом требуемой ремонтной информации связано со значительными затратами времени на ее поиск

и агрегирование из-за необходимости использования большого числа эксплуатационных документов [7]. Это обуславливает актуальность задачи по сокращению времени формирования ремонтной информации, требуемой обслуживающему персоналу при настройках радиоэлектронной аппаратуры в процессе текущего ремонта СТК. Решение данной задачи связано с совершенствованием средств информационной поддержки за счет повышения уровня автоматизации деятельности обслуживающего персонала, связанной с поиском ремонтной информации [8].

В данной работе сокращение времени формирования ремонтной информации связывается с переходом к формализованному концептуальному представлению процесса настройки РЭА на основе многоаспектного подхода. Такое представление характеризуется использованием предметных терминов и понятий естественного языка в формализованном описании процесса ремонта аппаратуры, в литературе такое представление отсутствует.

## Настройка радиоэлектронной аппаратуры как составная часть текущего ремонта сложных технических комплексов

Процесс настройки/регулировки аппаратуры представляет собой последовательность действий обслуживающего персонала, связанных с поиском разрегулированных элементов, действий с регулировочными органами для установки требуемых значений параметров и с оценкой результата проведения настройки. Процесс настройки может быть представлен в виде последовательности шагов, каждый из которых может быть представлен триадой «действие — оценка результата — принятие решения». На каждом шаге решение об окончании настройки или проведении дальнейших шагов зависит от результатов, полученных на предыдущих шагах.

Перед выполнением первого шага настройки аппаратуры обслуживающий персонал располагает первичной информацией о разрегулировке, полученной по косвенным признакам либо при проведении контроля технического состояния изделия.

Процесс настройки и регулировки продолжается до тех пор, пока все параметры не окажутся в допуске. Настройку изделия проводят последовательно от отдельных узлов и блоков до всего изделия в комплексе (рис. 1). При комплексной настройке проводится согласованная настройка блоков и систем для обеспечения заданных требований к выходным общесистемным параметрам [3].

Как видно из рис. 1, время текущего ремонта можно представить в следующем виде:

$$T_{\text{ТР}} = (t_{\text{ТД}} + t_{\text{УН}}) \cdot k_{\text{РТ}} = (t_{\text{КТС}} + t_{\text{ДН}} + (t_{\text{РИ1}} + t_{\text{АН}} + (t_{\text{РИ2}} + t_{\text{ОН}} + t_{\text{КН}}) \cdot t_{\text{Н}}) \cdot t_{\text{УН}}) \cdot t_{\text{ТР}} \quad (1)$$

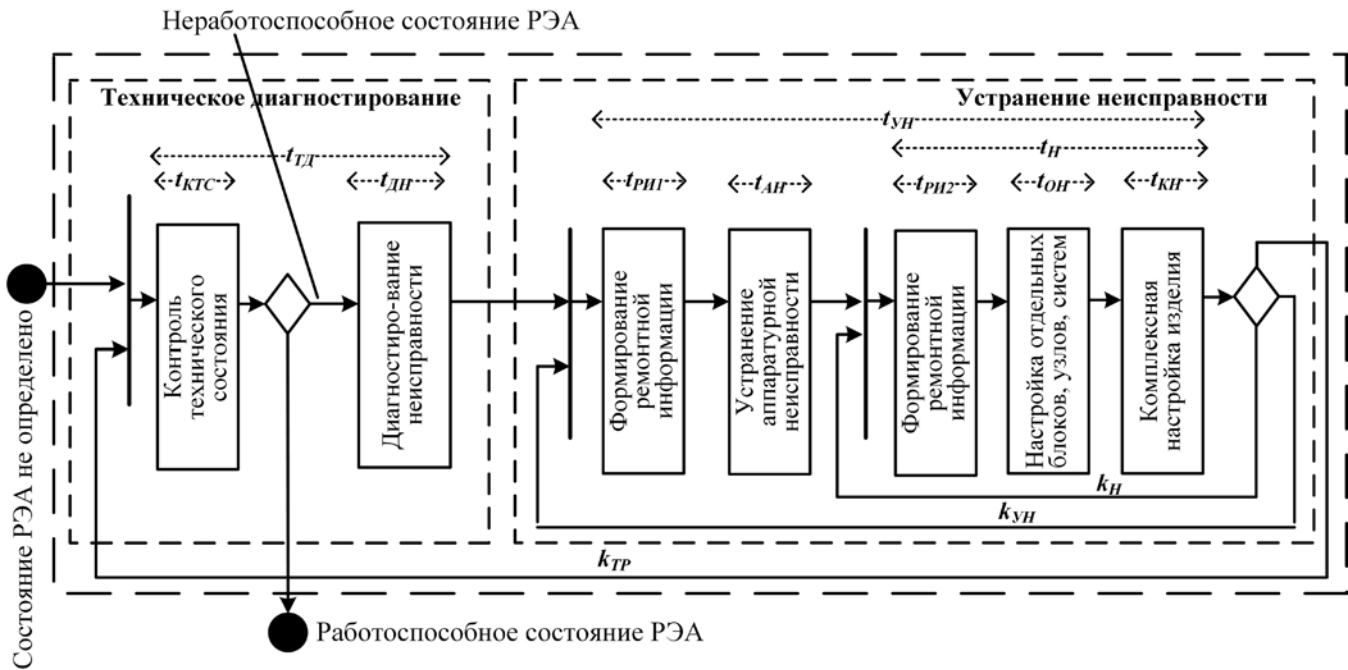


Рис. 1. Процесс текущего ремонта РЭА с временными параметрами операций

где  $t_{ТД}$  — время выполнения операции технического диагностирования,  $t_{УН}$  — время выполнения операции устранения неисправности, — время выполнения операции контроля технического состояния, — время выполнения операции диагностирования неисправности,  $t_{РН1}$  — время выполнения операции формирования ремонтной информации при устранении аппаратурной неисправности,  $t_{АН}$  — время выполнения операции устранения аппаратурной неисправности,  $t_{РН2}$  — время выполнения операции формирования ремонтной информации при настройке аппаратуры,  $t_{ОН}$  — время выполнения операции настройки отдельных блоков, узлов и систем,  $t_{КН}$  — время выполнения операции комплексной настройки изделия,  $t_{Н}$  — число посторений цикла настройки аппаратуры,  $t_{УН}$  — число посторений цикла устранения неисправности,  $t_{ТР}$  — число посторений цикла текущего ремонта.

Следует отметить, что при обнаружении отказа не всегда возможно заранее установить его характер: параметрический или структурный (аппаратурный). Поэтому в процессе настройки возможен переход на устранение аппаратурной неисправности с последующим возвращением к настройке. Собственно последовательность и вид выполняемых при этом действий априорно обычно неизвестны, что характеризует высокий уровень неопределенности процесса настройки аппаратуры. С учетом такой неопределенности, достижение положительного результата настройки РЭА во многом определяется используемыми средствами информационной поддержки.

### Анализ средств информационной поддержки процесса настройки РЭА

Для выполнения различных действий, оценки их результата и принятия решения обслуживающему персоналу требуется разнородная ремонтная информация, источником которой является эксплуатационная документация, выступающая в качестве информационного ресурса. Требуемая в конкретной ситуации ремонтная информация может находиться не в каком-то одном определенном документе, а в нескольких различных источниках. В качестве таких источников выступает совокупность текстовых и графических документов, которые могут быть представлены как в бумажном, так и в электронном виде.

Использование такого информационного ресурса для обеспечения обслуживающего персонала требующейся ремонтной информацией организуется с помощью средств систем информационной поддержки (СИП), имеющей различный уровень автоматизации. Характеризуя использование существующих СИП с точки зрения настройки РЭА, следует отметить недостаточно высокий уровень их автоматизации. Это обусловлено тем, что формирование ремонтной информации в существующих СИП производится в основном на основе просмотра и анализа текстовых документов и электрических схем на аппаратуру в связи с поиском информации, касающейся порядка выполнения отдельных настроек РЭА, а также участков схем, связанных с настройками. Выполнение таких действий в настоящее время слабо поддерживается существующими средствами автоматизации СИП.



В ремонтной практике встречается еще один вид информационной поддержки выполнения настроек РЭА, основанный на использовании мнемосхем [9]. При таком представлении используемые при настройке органы регулировки, контрольно-измерительная аппаратура и другие элементы настроек представляются схематично с помощью различных условных обозначений. В эксплуатационной документации мнемосхемы используются редко, правила составления мнемосхем, а также требования к условным обозначениям на таких схемах не регламентированы. Обычно мнемосхемы разрабатываются обслуживающим персоналом для личного пользования, так что средства автоматизации для использования мнемосхем в процессе настройки отсутствуют.

Отсутствие развитых средств автоматизации информационной поддержки процесса настройки РЭА приводит к тому, что затраты времени на формирование ремонтной информации оказываются значительными, что негативно отражается на общем времени ремонта.

В данной работе отмеченный пробел устраняется за счет разработки формализованного концептуального представления операций настройки радиоэлектронной аппаратуры на основе семантических структур, в частности, фреймов и семантических шаблонов.

#### Формализованное представление структурного аспекта процесса настройки РЭА на основе фреймов

Формально ремонтную информацию, используемую обслуживающим персоналом в процессе настройки, можно представить совокупностью информационных элементов. Каждый информационный элемент содержит определенные сведения из текстовой и схемной документации в части, касающейся соответствующего действия настройки.

Ремонтную информацию об операциях настройки РЭА возможно структурировать на основе множества фреймов: фреймы операций настройки, фреймы действий, фреймы параметров, фреймы органов регулировки и другие. При этом каждый фрейм имеет собственное имя и представляется в виде совокупности слотов с их значениями [10].

Фрейм операции настройки может иметь следующие слоты (см. табл.):

- настраиваемые параметры;
- действия;
- органы регулировки;
- инструмент;
- контрольно-измерительная аппаратура;
- индикация;
- контрольные точки;
- продолжительность;
- взаимосвязанные настройки.

В свою очередь в качестве значений каждого из указанных слотов фрейма операции настройки, могут выступать другие фреймы со своими слотами и их значениями.

Всякий определенный таким образом фрейм  $f$  можно рассматривать как формальную модель для представления структурного аспекта соответствующей операции настройки. Совокупность всех фреймов  $F = \{f_1, f_2, \dots\}$  определяет формализованное представление структурного аспекта процесса настройки.

С помощью фреймов удобно в виде семантических конструкций на основе отношений представлять информацию о свойствах различных элементов операций настройки РЭА. Однако, фреймы ограничены разнообразием задаваемых отношений. Это ограничение проявляется в том, что структура фрейма имеет определенные ограничения по представлению деятельностного (процессного) и вре-

Таблица

Структура фрейма операции настройки

<b>Фрейм операции настройки</b>	<b>Имя фрейма операции настройки</b>
<i>имя слота</i>	<i>значение слота</i>
настраиваемые параметры	название параметра 1; ...; название параметра $r$
действия	название действия 1; ...; название действия $n$
органы регулировки	название органа регулировки 1; ...; название органа регулировки $m$
инструмент	название инструмента 1; ...; название инструмента $k$
контрольно-измерительная аппаратура	название аппаратуры 1; ...; название аппаратуры $z$
индикация	название индикации 1; ...; название индикации $f$
контрольные точки	название контрольной точки 1; ...; название контрольной точки $p$
продолжительность	значение времени операции настройки
взаимосвязанные настройки	название настройки 1; ...; название настройки $g$



менного аспектов операций настройки. Для снятия указанного ограничения целесообразно использовать другую семантическую конструкцию — семантический шаблон [11].

**Формализованное представление деятельностного и временного аспектов процесса настройки РЭА на основе семантических шаблонов**

Для построения семантических шаблонов, отражающих различные аспекты операций настройки РЭА, предлагается представлять операцию настройки как совокупность самостоятельных понятийных единиц — сущностей и отношений между ними. Примерами сущностей в операциях настройки РЭА являются: «номинальное значение параметра», «орган регулировки» и т.п., а примерами отношений являются «имеет», «расположен на», «устанавливается в» и т.п. Множество всех сущностей для операции настройки ниже обозначается символом  $\hat{E}$ , а множество всех отношений — символом  $\hat{\Omega}$ .

Для построения семантических шаблонов операций настройки предлагается использовать триплетную форму задания отношений между сущностями, которая используется в семантических сетях. Всякий триплет  $v$  имеет структуру вида «субъект-отношение-объект» и формально может быть записан в виде выражения

$$v = \langle x \Omega y \rangle, \tag{1}$$

где  $x, \Omega, y$  определяются понятиями предметной области в терминах естественного языка.

Создание семантического шаблона операции настройки целесообразно осуществлять на основе соответствующих шаблонов всех сущностей, отражающих их предметный смысл в представлении различных аспектов.

Формально для всякой сущности  $E$  семантический шаблон  $S(x)$  представляется в виде выражения:

$$S(x) = \bigcup_{y \in \hat{E}, \Omega \in \hat{\Omega}} \{(x \Omega y)\}, \tag{2}$$

где  $O$  — обозначение операции объединения в теоретико-множественном смысле.

Создание семантических шаблонов, соответствующих различным аспектам настройки РЭА, имеет свои особенности.

Триплеты, участвующие в формировании структурных семантических шаблонов  $S_c$  имеют вид «кнопочный переключатель — расположен на — блок», «тумблер — имеет — исходное положение», «регулирующая ручка — имеет — название». Графически пример шаблона такого вида показан на рис. 2.

Для представления деятельностного аспекта операций настройки РЭА в формализованном виде предлагается посредством семантических шаблонов описать все элементы операций, над которыми или с помощью которых совершаются действия. При этом в отличие от структурного аспекта, где для задания свойств элементов РЭА триплет имеет структуру вида «субъект-отношение-объект», триплет для описания элементов настройки РЭА, связанных с выполнением действий, должен иметь структуру вида «субъект — действие — объект».

Примером триплета, определяющего действия при настройке аппаратуры является высказывание «регулирующая ручка А настраивает параметр Б», в котором отношение деятельности «настраивает» связывает два элемента настройки — «регулирующая ручка А» и «параметр Б». Однако, описание конкретных настроек РЭА в эксплуатационной документации обычно связывает действия и элементы настроек в повелительной форме без указания субъекта, например: действие  $D'$  — «нажать кнопочный переключатель А», действие  $D''$  — «включить блок Б». Для учета таких особенностей описания действий в эксплуатационной документации в формализованном представлении операций на основе семантических шаблонов целесообразно ввести абстрактного субъекта, в качестве которого выступает обслуживающий персонал. Тогда повелительная форма действий может быть представлена в виде соответствующего триплета: «субъект нажимает кнопочный переключатель А», «субъект включает блок Б».

Использование субъекта приводит к созданию семантического шаблона, пример которого показан на рис. 3. Семантический шаблон такого типа следует рассматривать

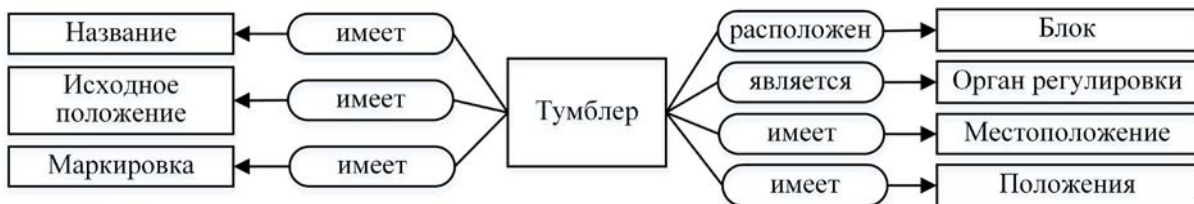


Рис. 2. Структура семантического шаблона сущности «тумблер»

как формализованное концептуальное представление действий операции настройки РЭА на основе триплетов, определяемых в предметных терминах естественного языка.

Для представления временного аспекта используются триплеты вида: «действие А — является — начальное действие», «действие С — является — конечное действие», «действие Б — предшествует — действие В». Пример семантического шаблона для представления временного аспекта изображен на рис. 4.

Таким образом может быть создано множество семантических шаблонов  $S_d$  и  $S_v$ , которые характеризуют соответственно деятельностный и временной аспекты процесса настройки РЭА. Полная совокупность семантических шаблонов  $S_{ш} = S_d \cup S_v$  определяет формальную модель для представления процессного и временного аспектов настройки РЭА.

С учетом одновременного использования фреймов и семантических шаблонов предлагаемое формализованное представление  $P_n$  процесса настройки РЭА может быть записано в следующем виде:

$$P_n = \langle F, S_{ш} \rangle.$$

Формализация такого вида характеризуется тем, что все элементы в представлении  $P_n$  образуют единую мо-

дель, определяющую процесс настройки РЭА в виде формальной системы в предметных понятиях и терминах, выражаемых на естественном языке.

### Заключение

Предложенный подход к формализации представления настроек РЭА на основе таких семантических структур, как фреймы и семантические шаблоны, обеспечивает упорядочивание и структуризацию сведений, определяющих ремонтную информацию, необходимую для выполнения операций настройки РЭА в процессе текущего ремонта. Особенность такого представления состоит в том, что оно выполнено в терминах и понятиях естественного языка в соответствии с эксплуатационной документацией. Это позволяет рассматривать предложенное представление настроек как формальную концептуальную модель операций настройки, которая создает основу для автоматизации информационного обеспечения обслуживающего персонала сведениями об этих операциях, выражаемых на естественном языке. Использование такой модели способствует развитию средств автоматизации информационной поддержки обслуживающего персонала РЭА СТК и имеет целью уменьшение времени, затрачиваемого на выполнение текущего ремонта РЭА.



Рис. 3. Структура семантического шаблона сущности «субъект»

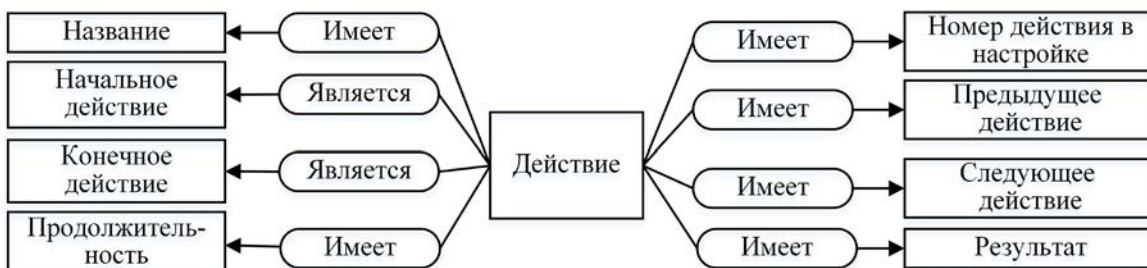


Рис. 4. Структура временного семантического шаблона сущности «действие»



### Литература

1. *Давыдов П. С.* Техническая диагностика радиоэлектронных устройств и систем. М.: Радио и связь, 1988. 256 с.
2. *Самусенко В. Н.* Техническая эксплуатация и войсковой ремонт ВВТ ЗРВ. Основы теории надежности, технического обслуживания и ремонта ВВТ. Тверь: Изд-во ВУ ПВО, 2003. 344 с.
3. *Скачков В. Н., Иванов Д. Н., Ребров А. С., Бондаренко Д. Л.* Технология настройки и регулировки радиотехнических систем, устройств и блоков. Смоленск: Изд-во ВА ВПВО ВС РФ, 2014. 126 с.
4. *Журов Ю. И., Потапов А. С.* Теоретические основы технического обслуживания и ремонта электронного оборудования и ремонта электронного оборудования и систем автоматического управления. Владивосток: Изд-во ТОВВМУ им. С. О. Макарова, 2015. 180 с.
5. *Доник А. А., Смагулов А. Б.* Проведение диагностики и ремонта различных видов радиоэлектронной техники. Петродворец: Изд-во ВИ (ВМП) ВУНЦ ВМФ ВМА, 2015. 96 с.
6. *Диго Г. Б., Диго Н. Б.* К оценке вероятности успешной настройки выходных параметров сложных технических систем // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 3 (11). С. 61–64.
7. *Анисимов О. В.* Модели радиоэлектронной аппаратуры как основа организации информационных интерфейсов в системах автоматизации технической эксплуатации. М.: Lannex Corp., 2013. 200 с.
8. *Анисимов О. В., Курчидис В. А., Приветень А. С., Попов Т. А., Рыбакин А. А.* Метод информационной поддержки обслуживающего персонала при восстановлении радиоэлектронной аппаратуры // Материалы Всероссийской научной конференции «Современные тенденции развития теории и практики управления в системах специального назначения» (Москва, 14 мая 2014 г.). М.: Концерн «Системпром», 2014. С. 33–45.
9. *Савчук В. Л.* Электронные средства сбора, обработки и отображения информации. Томск: ТУСУР, 2007. 174 с. URL: <http://www.ie.tusur.ru/books/COI/index.htm/> (дата обращения 04.09.2019).
10. *Минский М.* Фреймы и представление знаний. М.: Энергия, 1979. 150 с.
11. *Курчидис В. А., Анисимов О. В., Яценко А. В., Пугачев А. Ю., Молоканова В. В.* Многоаспектное концептуальное формализованное представление радиоэлектронной аппаратуры на основе семантических шаблонов // Сборник трудов Международной молодежной научно-практической конференции «Путь в науку. Радиотехнические системы» (Ярославль, 27 апреля 2018 г.). Ярославль, 2018. С. 152–159.

---

## FORMALIZED REPRESENTATION OF THE RADIOELECTRONIC EQUIPMENT TUNING PROCESS FOR INFORMATION SUPPORT MEANS OF TECHNICAL COMPLEXES REPAIR

**SERGEY I. KIRICHENKO,**

Yaroslavl, Russia, ynzha@yandex.ru

**VIKTOR A. KURCHIDIS,**

Yaroslavl, Russia, idahmer2@yandex.ru

**KEYWORDS:** information support; restoration; current repair; repair time; radioelectronic equipment.

### ABSTRACT

The word deals with the process of tuning radioelectronic equipment in the current repair of complex technical complexes. A characteristic feature of the tuning process during recovery is the general uncertainty of the actions performed. The time to provide maintenance personnel with repair information is long. To reduce

the time it is necessary to improve the automation of information support of staff. It is proposed to develop a formalized conceptual representation of the repair process on the basis of semantic structures. The process of setting up the equipment includes: search for misaligned elements, actions with the regulatory authorities to set



the required values of the parameters, evaluation of the result of the adjustment. A multi-aspect approach is used to formalize the presentation of such a process. The approach takes into account the structural, activity (process) and time aspects. Frames and semantic templates are used as semantic structures for such representation. The structural aspect reflects the elemental composition of the settings of radioelectronic equipment. The structural aspect is represented on the basis of frames. Representation of the process and time aspects is based on semantic templates. For the construction of such semantic structures it is necessary to analyze the subject area and to identify in it independent conceptual units-entities and relations between them. This work describes the rules and examples for building frames and semantic templates for tuning operations. A complete set of frames and semantic patterns defines a formalized representation of the process of tuning radioelectronic equipment. A formalized representation forms a single model. The model defines the tuning process as a formal system in subject concepts and terms. These concepts and terms are expressed in natural language. The use of this model contributes to the development of automation information support staff. The use of the model helps to reduce the time of the current repair of radioelectronic equipment.

## REFERENCES

### References

1. Davydov P.S. *Tekhnicheskaya diagnostika radioelektronnyh ustroystv i sistem* [Technical diagnostics of radio-electronic devices and systems]. Moscow: Radio i svyaz', 1988. 256 p.
2. Samusenko V.N. *Tekhnicheskaya ekspluatatsiya i vojskovojskoy remont VVT ZRV. Osnovy teorii nadezhnosti, tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta VVT* [Technical operation and military repair of VVT ZRV. Fundamentals of the theory of reliability, maintenance and repair of VVT]. Tver': VU PVO Publ., 2003. 344 p.
3. Skachkov V.N., Ivanov D.N., Rebrov A.S., Bondarenko D.L. *Tekhnologiya nastrojki i regulirovki radiotekhnicheskikh sistem, ustrojstv i blokov* [Technology of control and adjustment of radio engineering systems, devices and blocks]. Smolensk: VA VPVO VS RF Publ., 2014. 126 p.
4. Zhurov Yu.I., Potapov A.S. *Teoreticheskie osnovy tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta elektronnoy oborudovaniya i remonta elektronnoy oborudovaniya i sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Theoretical bases of maintenance and repair of the electronic equipment and repair of the electronic equipment and systems of automatic control]. Vladivostok: TOVVMU im. S.O. Makarova Publ., 2015. 180 p.
5. Donik A.A., Smagulov A.B. *Provedenie diagnostiki i remonta razlichnyh vidov radioelektronnoj tekhniki* [Carrying out diagnostics and repair of different types of radio-electronic equipment]. Petrodvorets: VI (VMP) VUNC VMF VMA Publ., 2015. 96 p.
6. Digo G.B., Digo N.B. On estimation of a probability of successful tuning of output parameters of complex technical systems. *Reliability and Quality of Complex Systems*. 2015. No. 3 (11). Pp. 61-64.
7. Anisimov O.V. *Modeli radioelektronnoj apparatury kak osnova organizatsii informatsionnyh interfejsov v sistemah avtomatizatsii tekhnicheskoy ekspluatatsii* [Models of radio-electronic equipment as a basis of the organization of information interfaces in systems of automation of technical operation]. Moscow: Lannex Corp., 2013. 200 p.
8. Anisimov O.V., Kurchidis V.A. *Metody informatsionnoy podderzhki obsluzhivayuschego personala pri vosstanovlenii radioelektronnoj apparatury* [Methods of information support of the service personnel at restoration of radio-electronic equipment]. *Materialy vserossiyskoy nauchnoy konferentsii "Sovremennye tendentsii razvitiya teorii i praktiki upravleniya v sistemah special'nogo naznacheniya"* [Proc. of the All-Russia scientific conference "Current trends of development of the theory and practice of management in systems of a special purpose", Moscow, 14 may 2014]. Moscow, 2014. Pp. 33-45. (In Russian)
9. Savchuk V.L. *Elektronnye sredstva sbora, obrabotki i otobrazheniya* [Electronic means of collecting, processing and displaying information]. Tomsk: TUSUR Publ., 2007. 174 p. URL: <http://www.ie.tusur.ru/books/COI/index.html/> (date of access 04.09.2019).
10. Minskij M. *Frejmy i predstavlenie znaniy* [Frames and representation of knowledge]. Moscow: Energiya, 1979. 150 p.
11. Kurchidis V.A., Anisimov O.V., Iashchenko A.V., Pugachev A.Y., Molokanova V.V. Radioelectronic equipment conceptual multidimensional representation based on semantic templates. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Put' v nauku. Radiotekhnicheskije sistemy"* [Proceedings of The international youth scientific and practical conference "The Way to science. Radio engineering systems", Yaroslavl, April 27, 2018]. Yaroslavl': YArGU Publ., 2018. Pp. 152-159.

## INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Kirichenko S.I., Postgraduate of the Yaroslavl Higher Military College Of Anti-Air Defense.

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



doi: 10.24411/2409-5419-2018-10296

# РЕЛЯЦИОННО-ОПЕРАТОРНЫЙ МЕТОД МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕДАЧИ МНОГОПАКЕТНЫХ СООБЩЕНИЙ ПО ВИРТУАЛЬНЫМ МАРШРУТАМ СЕТИ РАДИОСВЯЗИ

**ПОТАПОВ**  
**Сергей Евгеньевич**

## АННОТАЦИЯ

В работе проведён анализ основных методов математического моделирования процесса доведения сообщений по виртуальным маршрутам в сетях передачи данных с протоколами каналов связи, предусматривающими процедуру квитирования пакетов сообщения. На основе выявленных закономерностей процессов передачи информации сформирован новый подход к определению вероятностно-временных характеристик информационного обмена по виртуальным маршрутам сети передачи данных с коммутацией пакетов. Целью проведённого научного исследования является разработка математического аппарата для корректного описания процессов информационного обмена, обладающих свойством последействия. Методология исследования базируется на основах теории графов, теории вероятностей, реляционной алгебры, векторного анализа. В результате проведённого исследования сформирован новый методологический подход к математическому моделированию процессов информационного обмена в сетях передачи данных, учитывающий особенности доведения многопакетных сообщений по виртуальным маршрутам, который обладает достаточной общностью для его приложения к процессам в других областях науки и техники, обладающих свойством последействия. Также установлено, что оценивать своевременность информационного обмена по сетям передачи данных с коммутацией пакетов при определённых условиях с достаточной точностью можно с помощью простых эмпирических выражений, полученных в результате проведённого исследования. Кроме того, показано, что наибольшая погрешность определения оперативности доведения информации по виртуальным маршрутам имеет место при одинаковом среднем времени передачи пакетов сообщения по парциальным участкам маршрута. Результаты проведённого научного исследования целесообразно применять на стадии проектирования сетей передачи данных с квитированием факта доведения, а также в сетевом программном обеспечении коммутационного оборудования таких сетей для оценивания пригодности и выбора того или иного маршрута доведения сообщений между абонентами.

## Сведения об авторе:

к.т.н., старший преподаватель филиала  
Военной академии Ракетных войск стратегического  
назначения имени Петра Великого,  
г. Серпухов, Россия, 41kaf\_rabota@mail.ru

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** вероятностно-временные характеристики; сеть передачи данных; каналы передачи данных; производящие функции; многопакетные сообщения; конечные цепи Маркова.

---

**Для цитирования:** *Потапов С.Е.* Реляционно-операторный метод математического моделирования передачи многопакетных сообщений по виртуальным маршрутам сети радиосвязи // *Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли.* 2019. Т. 11. № 6. С. 61-73. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10296

Многие информационные приложения, использующие для своей работы сети передачи данных (СПД), предъявляют фиксированные требования к своевременности передачи информации между абонентами сети по виртуальным маршрутам (ВМ). Отметим, что своевременность оценивается вероятностно-временными характеристиками (ВВХ), под которыми понимается вероятность доведения сообщений за время, не превышающее заданное. При этом для СПД на базе проводных или высокоскоростных радиоканалов с высоким качеством по вероятности битовой ошибки, определение ВВХ и других характеристик доведения сообщений является тривиальной задачей, достаточно полно исследованной в ряде научных трудов [1–5]. Однако, нахождение характеристик процессов передачи информации по ВМ на каналах сети радиосвязи с высоким коэффициентом битовых ошибок, использующим адаптивные протоколы управления логическим каналом, требует отдельного подхода к определению ВВХ.

Процесс доведения многопакетных сообщений (МПС) по ВМ СПД предполагает, что все пакеты передаваемого МПС должны быть переданы по всем парциальным КС, составляющим ВМ, последовательно. При этом следование пакетов МПС по разным парциальным КС ВМ предполагает их независимую (параллельную) передачу [5]. Тогда информационные характеристики парциальных КС обуславливают общие ВВХ доведения МПС по всему ВМ. Именно поэтому при определении ВВХ доставки всего МПС от источника к получателю необходимо учитывать параллельность протекания процессов передачи пакетов в парциальных КС ВМ.

Вопросам оценки своевременности доставки одной и многопакетных сообщений по системе передачи данных уделено достаточное внимание в различных работах. В частности, в работах В. А. Цимбала и его научной школы [6–10] для разработки соответствующих моделей обосновано применение математического аппарата теории поглощающих конечных марковских цепей (ПКМЦ). При этом одной из наиболее важных характеристик конечных марковских цепей (КМЦ) является поведение (изменение во времени) вероятностей всех или некоторых состояний цепи. Такое изменение описывается известным уравнением Колмогорова–Чепмена [11, 12]. Однако применение теории ПКМЦ в классической постановке задачи определения ВВХ попадания процесса в поглощающие состояния обосновано только при одинаковой длительности шага переходов из всех состояний процесса.

Развитие теории ПКМЦ для исследования поведения процессов с различными по длительности шагами переходов наиболее адекватно описывающих работу протоколов передачи данных с решающей обратной связью (РОС), получено в работах В. А. Цимбала [7–10]. В частности, известны способы усреднения шагов перехода процесса

в динамике поведения таких процессов, а также использование фиктивных состояний для приведения всех времён переходов процесса к единому значению. Кроме того, известен метод анализа временных характеристик неоднородной ПКМЦ с непостоянными по длительности шагами переходов, предложенный в работе [8]. Однако все вышеуказанные подходы к математическому моделированию процедур (протоколов) передачи данных по КС не применимы для исследования ВВХ процесса доведения МПС, где длительности шагов переходов имеют стохастический характер и, кроме того, не могут быть использованы при описании доведения сообщений по составным ВМ.

В работе [13] предложен новый операторный метод определения характеристик передачи МПС по КС с РОС, который свободен от указанных выше недостатков. Он основан на представлении вероятностей ( $p_{ij}$ ) и времён ( $\tau_{ij}$ ) переходов процесса в виде производящих (характеристических) функций этих переходов  $g_{ij}(s) = p_{ij}e^{s\tau_{ij}}$ , где  $s$  — произвольная переменная.

С помощью индуктивного метода исследования рассмотрим развитие данного математического аппарата анализа ВВХ доведения МПС для процессов их передачи по ВМ сети передачи данных.

Рассматривается доставка однопакетного сообщения по системе передачи данных с РОС в соединении «точка-точка», моделируемая неоднородной ПКМЦ, граф состояний и переходов (ГСП) которой представлен на рис. 1. В информационном обмене участвуют звено передачи данных отправитель (ЗПД-1) и звено передачи данных получатель (ЗПД-2).

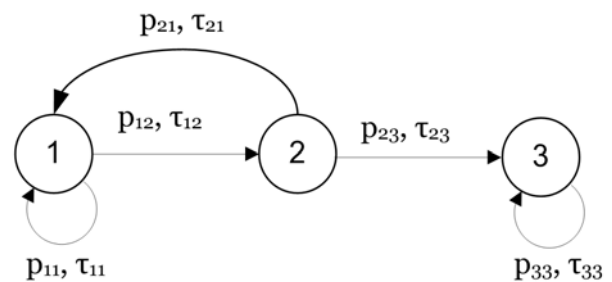


Рис. 1. ГСП доставки однопакетного сообщения по протоколу с РОС

Семантика состояний (С) представленного ГСП такова:

- $C_1$  — ЗПД-1 выдал очередной повтор пакета (пакета), но пакет на ЗПД-2 не принят;
- $C_2$  — ЗПД-2 принял повтор пакета и выдал в ответ квитанцию;
- $C_3$  — ЗПД-1 квитанцию получил.

Матрица переходных вероятностей (МПВ) и аналогичная ей матрица шагов-переходов (МШП) для этого случая будут иметь вид (1).

$$P_{[3,3]} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & 0 \\ p_{21} & 0 & p_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, T_{[3,3]} = \begin{bmatrix} \tau_{11} & \tau_{12} & 0 \\ \tau_{21} & 0 & \tau_{23} \\ 0 & 0 & z \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $p_{ij}$  — вероятность, а  $\tau_{ij}$  — время перехода из состояния  $C_i$  в состояние  $C_j$ .

В общем случае время на передачу пакета не равно времени на передачу квитанции ( $\tau_{п} \neq \tau_{кв}$ ). Если вероятности доведения (недоведения) пакета и квитанции не зависят от номера повтора передачи, то процесс доведения сообщения можно представить более простым графом и соответствующей ему МПВ (рис. 2), в котором вероятности переходов будут определяться выражениями  $p_{12} = p_{п} \cdot p_{кв}$ ;  $p_{11} = p_{п} \cdot p_{кв} + q_{п}$ ;  $p_{22} = 1$ ; где  $p_{п}$  — вероятность правильного доведения пакета по прямому КС,  $p_{кв}$  — вероятность правильного доведения квитанции по обратному КС,  $q_{п}$  и  $q_{кв}$  — соответственно вероятности недovedения пакета и квитанции.

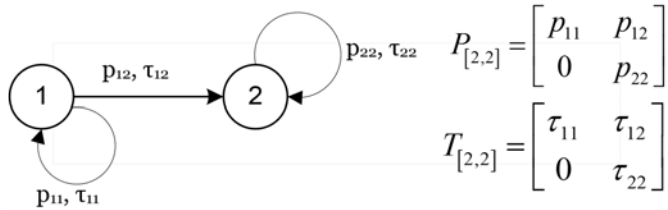


Рис. 2. Граф процесса доведения 1 пакета с  $n$  повторами

В общем случае, вероятность доведения сообщения за  $k$  повторов равна  $P_{\text{дов}}(k) = P_2 = (p_{11})^{k-1} \cdot p_{12}$ . Время перехода из  $C_1$  в  $C_1$  с вероятностью  $p_{п} \cdot p_{кв}$  будет равно  $\tau_{11} = (\tau_{п} + \tau_{кв})$ , а с вероятностью  $q_{п}$  будет равно  $\tau_{п}$ , что можно выразить [13] как  $g_{11}(s) = p_{п} \cdot p_{кв} \cdot e^{s(\tau_{п} + \tau_{кв})} + q_{п} \cdot e^{s\tau_{п}}$ . Время перехода из  $C_1$  в  $C_2$  будет равно  $\tau_{12} = \tau_{п}$ , следовательно  $g_{12}(s) = p_{п} \cdot e^{s\tau_{п}}$ . Производящая функция вероятности времени доведения пакета за  $n$  повторов будет равна  $F_{12}(s) = g_{11}(s)^{k-1} \cdot g_{12}(s)$ . Общий вид данной функции таков:

$$F_{12} = P_1 e^{s\tau_1} + P_2 e^{s\tau_2} + \dots + P_l e^{s\tau_l} + \dots + P_L e^{s\tau_L} = \sum_{l=1}^L P_l e^{s\tau_l} = \sum_{l=1}^L g_{12}^{(l)}(s),$$

где  $P_l = g_{12}^{(l)}(0)$  — вероятность попадания из  $C_1$  в  $C_2$  за время  $t_l = (1/P_l) \cdot \left. \frac{d(g_{12}^{(l)}(s))}{ds} \right|_{s=0}$  за число шагов процесса меньшее

или равное  $k$ . Таким образом, получается ряд распределения вероятностей доведения сообщения вида  $P_{\text{дов}} = f(t = t_l)$ , из которого находится искомая вероятность доведения за время, не превышающее заданное, т.е. ВВХ:

$$P_{\text{дов}}(t \leq t_{\text{зад}}) = F(t_{\text{зад}}) = \sum P_{\text{дов}} | t \leq t_{\text{зад}}$$

Следуя согласно приведённому выше подходу к определению ВВХ, получим точное распределение вероятностей времени доведения однопакетного сообщения за фиксированное число повторов передачи.

Рассмотрим процесс доведения однопакетного сообщения по ВМ, содержащему два транзитных КС (то есть одно промежуточное ЗПД). ГСП, описывающий взаимодействие состояний процесса, представлен на рис. 3, а МПВ и МШП для данного ГСП представлена выражениями (2).

$$P_{[3,3]} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & 0 \\ 0 & p_{22} & p_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, T_{[3,3]} = \begin{bmatrix} \tau_{11} & \tau_{12} & 0 \\ 0 & \tau_{22} & \tau_{23} \\ 0 & 0 & z \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $p_{ij}$ ,  $\tau_{ij}$  — вероятность и время доведения пакета из УС  $C_i$  в УС  $C_j$  ( $i, j = [1, 2, 3]$ ). Причём  $\tau_{ij} = \tau_{ik}$ , а  $p_{ij} = 1 - p_{ik}$ .

Доведение пакета по ВМ соответствует попаданию процесса из  $C_1$  в  $C_3$ . Из анализа ГСП на рис. 3 следует, что процесс может попасть в состояние  $C_3$  только из состояния  $C_2$ . Тогда процесс доведения пакета по ВМ можно разделить на две последовательные фазы: передача пакета в промежуточное ЗПД и передача однопакетного сообщения получателю. Каждая из указанных фаз описывается подграфом ГСП рис. 3, содержащим соответствующие состояния и переходы между ними. Стоит отметить, что оба подграфа по семантике и структуре идентичны ГСП рис. 2 для передачи пакета по КС. Учитывая тот факт, что передача однопакетного сообщения от промежуточного УС получателю будет осуществляться только после его доведения в промежуточное ЗПД, то общее время передачи однопакетного сообщений по ВМ будет складываться из времени его доведения в промежуточное ЗПД и времени его доведения из промежуточного ЗПД получателю. Поэтому производящая функция моментов времени передачи однопакетного сообщения по ВМ будет равна произведению производящих функций моментов времени его передачи по первому и второму КС ВМ  $F_{13}(s) = F_{12}(s) \cdot F_{23}(s)$ .

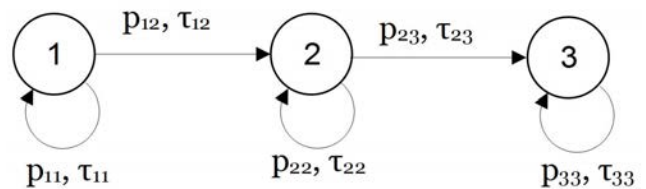


Рис. 3. ГСП передачи 1 пакета по ВМ с 2-мя КС



Рассмотрим процесс доведения 2-х пакетного сообщения по ВМ, состоящему из двух транзитных КС. ГСП для такого процесса представлен на рис. 4.

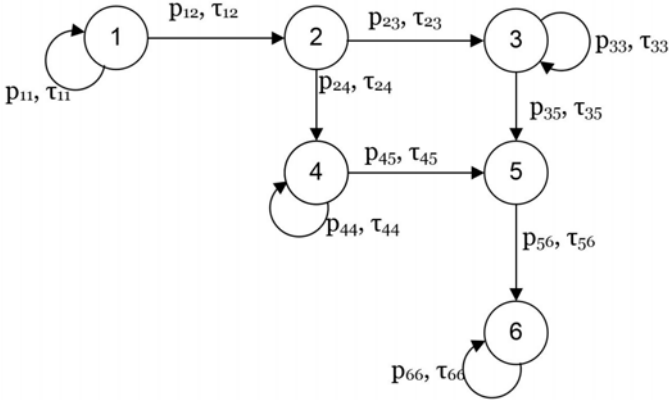


Рис. 4. ГСП процесса доведения 2-х пакетного сообщения по ВМ

На ГСП процесса рис. 4 обозначены следующие состояния (С):

$C_1$  — оба пакета сообщения находятся в ЗПД-отправителе, осуществляется передача первого пакета;

$C_2$  — первый пакет сообщения доставлен в промежуточное ЗПД, осуществляется передача второго пакета по первому КС и первого пакета по второму КС;

$C_3$  — оба пакета сообщения находятся в промежуточном ЗПД, осуществляется передача первого пакета по второму КС;

$C_4$  — второй пакет сообщения доставлен в ЗПД-получатель, осуществляется передача второго пакета по первому КС;

$C_5$  — второй пакет сообщения доставлен в промежуточное ЗПД, первый пакет сообщения доставлен в ЗПД-получатель, осуществляется передача второго пакета по второму КС;

$C_6$  — оба пакета сообщения находятся в ЗПД-получателе, передача сообщения завершена.

МПВ и МШП для данного ГСП представлены выражениями (3).

$$P_{[6,6]} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{23} & p_{24} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{33} & 0 & p_{35} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & p_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$T_{[6,6]} = \begin{bmatrix} \tau_{11} & \tau_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \tau_{23} & \tau_{24} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \tau_{33} & 0 & \tau_{35} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \tau_{44} & \tau_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \tau_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

При этом, если время шагов переходов представляет собой ряд распределения вероятностей, то ГСП и соответствующие компоненты МПВ и МШП можно представить в следующем модифицированном виде (рис. 5), где  $g_{ij}$  есть производящие функции моментов распределения вероятностей времени переходов.

Особенностью описываемого процесса доведения сообщения является то, что переходы из  $C_2$  в  $C_3$ , из  $C_2$  в  $C_4$  и из  $C_2$  в  $C_5$  осуществляются параллельно и невозможно заранее предсказать, какой из них завершится раньше другого, так как время обоих переходов имеет случайный характер. Такие переходы будем называть условными.

Кроме того, от времени осуществления перехода из  $C_2$  в  $C_j$  будет зависеть время перехода  $C_j$  в  $C_5$ . Поэтому данный процесс обладает явным последствием и не может быть описан существующими методами исследования марковских и полумарковских процессов [11–12,14].

Для определения времени попадания процесса из  $C_2$  в  $C_5$  необходимо определить разность времени переходов  $C_2 - C_3$  и  $C_2 - C_4$ . Для этого воспользуемся следующими рассуждениями. Если время одного из параллельно идущих переходов распределено рядом вида  $P_1(\tau_i) = \langle p_i, \tau_i \rangle$  ( $i = \overline{1, n}$ ) с производящей функцией  $g_1(s)$ , а другого рядом вида  $P_2(\tau_j) = \langle p_j, \tau_j \rangle$  ( $j = \overline{1, m}$ ) с производящей функцией  $g_2(s)$ , то разность времени между первым и вторым переходами будет распределена рядом вида (4).

$$P_{\Delta}(\tau_i - \tau_j) = \langle p_i \cdot p_j, \tau_i - \tau_j \rangle \quad (i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m}), \quad (4)$$

который можно представить в виде производящей функции вида (5).

$$g_{i_1 - i_2}(s) = g_{\Delta}(s) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p_i \cdot p_j \cdot e^{s(\tau_i - \tau_j)} \quad (5)$$

Тогда правую часть равенства можно выразить как произведение  $g_1(s) \cdot g_2'(s)$ , где  $g_2'(s)$  — сумма ряда переменных вида  $p_j \cdot e^{-s\tau_j}$  (в случае использования характеристической функции — комплексно сопряжённых к переменным ряда  $g_2(s)$ ). Сумма ряда (5) представляет из себя сумму распределения вероятностей времён, когда  $t_1 > t_2$ , когда  $t_1 < t_2$  и когда  $t_1 = t_2$  (рис. 6).

При этом мат. ожидание разницы времени переходов может быть, как положительной, так и отрицательной величиной и равна (6).

$$g_{\Delta}(s) = \underbrace{P_1 e^{s(\tau_i - \tau_j)} + P_2 e^{s(\tau_i - \tau_j)} + \dots + P_l e^{s(\tau_i - \tau_j)}}_{\Delta\tau < 0} + \underbrace{P_{l+1} e^{s(\tau_i - \tau_j)} + \dots + P_k e^{s(\tau_i - \tau_j)}}_{\Delta\tau = 0} + \underbrace{P_{k+1} e^{s(\tau_i - \tau_j)} + \dots + P_{nm} e^{s(\tau_i - \tau_j)}}_{\Delta\tau > 0}$$

$$g_{t_2 - t_1}(s)$$

Рис. 6. Форма ряда распределения вероятностей разницы времён переходов параллельных процессов

$$M[\tau_i - \tau_j] = \left. \frac{d(g_{\Delta}(s))}{ds} \right|_{s=0} = M[\tau_i] - M[\tau_j]. \quad (6)$$

Для определения распределения вероятностей времени опережения второго перехода удобнее оперировать производящими функциями распределения времени переходов, тогда распределение  $P_{t_1 - t_2}(\tau)$  необходимо получать по формуле (5), где  $l = [1, nm]$ . Аналогичным образом можно получить распределение времени опережения первого перехода  $P_{t_2 - t_1}(\tau)$ :  $g_{t_2 - t_1}(s)$ . Вероятность совпадения времени обоих переходов можно определить из выражения (7).

$$P(t_1 = t_2) = g_{\Delta}(0) - \sum_l P_{t_2 - t_1}(\tau_l) - \sum_k P_{t_1 - t_2}(\tau_k). \quad (7)$$

Пусть распределение времени доведения пакета по первому КС маршрута имеет производящую функцию  $F_1(s)$ , а распределение времени доведения пакета по второму КС маршрута имеет производящую функцию  $F_2(s)$ . Для сокращения записи выражений в дальнейшем запись

параметра  $(s)$  будем опускать. Тогда переход  $g_{12} = F_1$ ; переход  $g_{23} = F_2 F_1'$ ; переход  $g_{24} = F_1 F_2'$ ; переход  $g_{35} = F_2 \cdot g_{23}'$ ; переход  $g_{45} = F_1 \cdot g_{24}'$ ;  $g_{26} = F_2$ . Следовательно, общее время доведения 2-х пакетного сообщения по виртуальному маршруту будет равно (8).

$$g_{1-6}(s) = g_{12} g_{23} g_{35} g_{56} = g_{12} g_{24} g_{45} g_{56} = g_{12} g_{25} g_{56} = F_1 F_2 F_1' F_2 (F_2 F_1)' F_2 = F_1 F_1 F_2' F_1 (F_1 F_2)' F_2 = F_1 F_2 F_{25}, \quad (8)$$

а ВВХ процесса передачи сообщения по маршруту будут определяться по приведённой выше схеме.

Для определения ВВХ процесса доведения 3-х пакетного сообщения по ВМ из двух КС ГСП будет иметь следующий вид (рис. 7).

На рис. 7 обозначены следующие состояния:

$C_1$  — три пакета сообщения находятся в ЗПД-отправителе, осуществляется передача первого пакета;

$C_2$  — первый пакет сообщения доставлен в промежуточное ЗПД, осуществляется передача второго пакета по первому КС и первого пакета по второму КС;

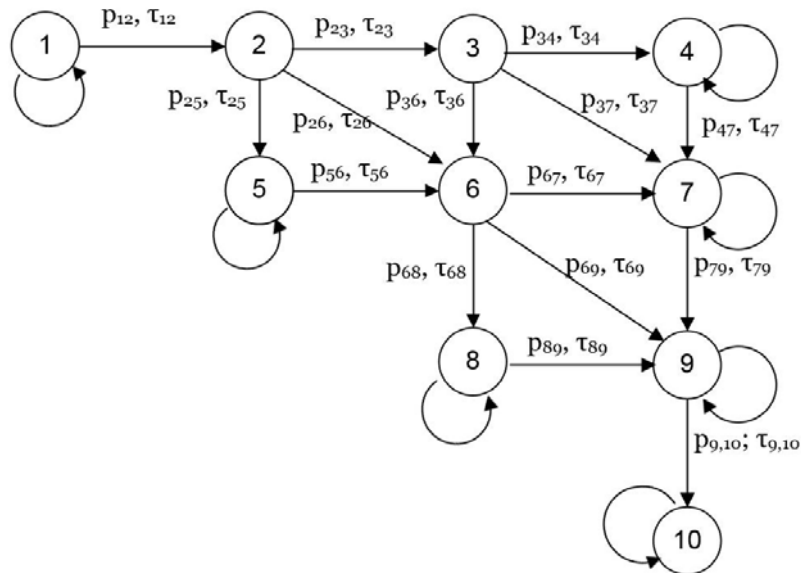


Рис. 7. ГСП процесса доведения 3-х пакетного сообщения по ВМ

$C_3$  — два пакета сообщения из трёх находятся в промежуточном ЗПД, осуществляется передача первого пакета по второму КС и третьего пакета по второму КС;

$C_4$  — все три пакета сообщения находятся в промежуточном ЗПД, осуществляется передача первого пакета по второму КС;

$C_5$  — первый пакет сообщения доставлен в ЗПД-получатель, осуществляется передача второго пакета по первому КС;

$C_6$  — первый пакет сообщения доставлен в узел-получатель, осуществляется передача третьего пакета по первому КС и второго пакета по второму КС;

$C_7$  — первый пакет сообщения доставлен в ЗПД-получатель, второй и третий пакеты доставлены в промежуточное ЗПД, осуществляется передача второго пакета по второму КС;

$C_8$  — первый и второй пакеты сообщения доставлены в ЗПД-получатель, осуществляется передача третьего пакета по первому КС;

$C_9$  — первый и второй пакеты сообщения доставлены в ЗПД-получатель, осуществляется передача третьего пакета по второму КС;

$C_{10}$  — все пакеты сообщения доставлены в ЗПД-получатель, передача информации завершена.

МПВ и МШП для данного ГСП по аналогии с предыдущим рассматриваемым случаем могут быть представлены производящими функциями вероятностей времени переходов, структурированными в виде производящей матрицы (9).

$$G_{[10,10]} = \begin{pmatrix} 0 & g_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_{23} & 0 & g_{25} & g_{26} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g_{34} & 0 & g_{36} & g_{37} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g_{47} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g_{56} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g_{67} & g_{68} & g_{69} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g_{79} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g_{89} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g_{9,10} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

В исследуемом процессе через производящие функции ВВХ парциальных КС по аналогии с предыдущим примером можно выразить такие переходы:

$$g_{12} = g_{23} = g_{34} = F_1; g_{25} = F_2; g_{36} = F_2 F_1'; g_{56} = F_1 F_2'; g_{47} = g_{36} F_1'$$

Остальные переходы процесса зависят от траектории их попадания в данное состояние. То есть исследуемый процесс также, как и предыдущий, обладает явным последствием. Однако в начальные состояния этих переходов процесс попадает через условные переходы. Поэтому глубина их последствий больше. Следовательно, для определения производящих функций вероятности времён таких переходов необходим другой подход.

Для определения точных значений вероятностей времён передачи сообщения по ВМ (пример на рис. 7) необходимо составить диаграмму траекторий реализации процесса доведения МПС, например, в следующем виде (рис. 8).

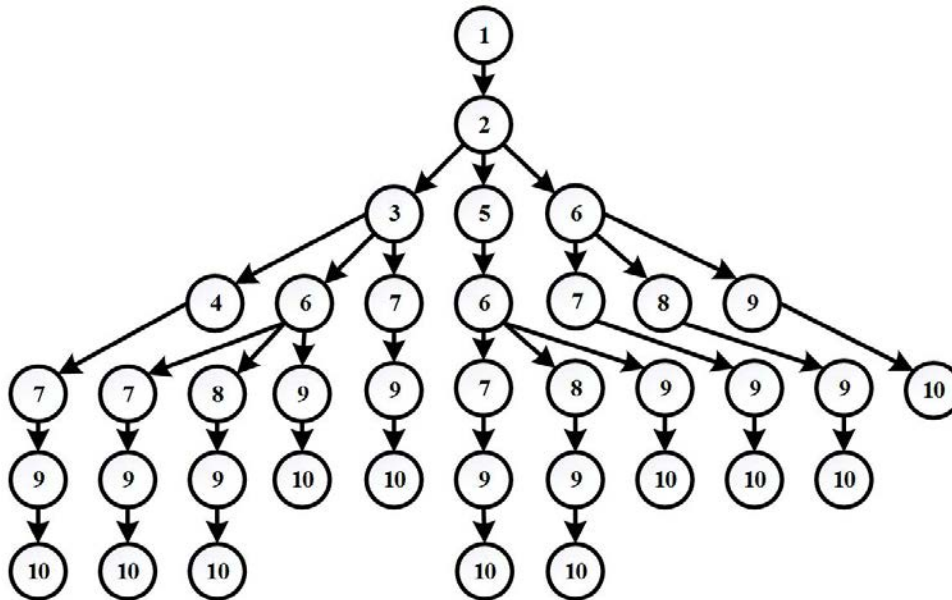


Рис. 8. Ансамбль траекторий движения процесса передачи 3-х пакетного сообщения по ВМ из двух КС

Получить подобную диаграмму траекторий движения процесса можно с помощью выражения (10).

$$h = \mathbf{A} \times \mathbf{G}^k(s) \times \mathbf{B}^T = g_{ij}(s), \quad (10)$$

где  $h$  — вектор-строка, содержащая все траектории движения процесса из  $C_1$  в  $C_{10}$ ;  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{B}$  — векторы размерности матрицы  $\mathbf{G}$ , элементы которых определяются по правилам:  $a_m = 0 | m \neq i$ ,  $b_m = 0 | m \neq j$ ,  $m = 1, n$ ;  $k$  — длина наибольшей траектории процесса.

Тогда ВВХ процесса доведения 3-х пакетного сообщения по ВМ, состоящему из двух последовательных КС, будет определяться как сумма распределений вероятности времени доведения по каждой из возможных траекторий движения процесса из  $C_1$  в  $C_{10}$ .

Для удобства демонстрации метода исследования ВВХ указанного процесса воспользуемся элементами математического аппарата реляционной алгебры [14]. При этом производящие функции переходов процесса удобно интерпретировать в виде множеств кортежей значений вероятности и времени того или иного перехода, представленные выражением (11).

$$g(s) = \sum_{i=1}^n p_i e^{s\tau_i} \leftrightarrow \Phi = \{ \langle p_1, \tau_1 \rangle; \dots; \langle p_i, \tau_i \rangle; \dots; \langle p_n, \tau_n \rangle \}. \quad (11)$$

Тогда к множествам  $\Phi$  можно применять все известные операции реляционной алгебры (операции  $\sigma$  — селекции,  $\pi$  — проекции,  $\times$  — декартового произведения) [15].

Рассмотрим траекторию исследуемого процесса, содержащую следующие состояния: 1–2–3–6–7–9–10.

Переход 1–2 происходит с распределением вероятности времени передачи пакета по первому КС  $F_1 \rightarrow \Phi_1$ . Переход 2–3 осуществляется параллельно переходу 2–5  $F_2 \rightarrow \Phi_2$ , соответствующему передаче пакета по второму КС, и происходит с распределением вероятности времени доведения пакета по первому КС. Поэтому процесс может перейти из состояния 2 в состояние 3 лишь при совместной реализации исходов обоих переходов, где время первого перехода меньше времени второго перехода. Тогда распределение вероятностей перехода 2–3 определяется из выражения (12).

$$\begin{aligned} \Phi_{23} &= \pi_{\tau^1 < \tau^2} (\sigma_{\tau^1 < \tau^2} (\Phi_1 \times \Phi_2)) = \\ &= \left\{ \langle p_j^1, p_i^2, \tau_j^1 \rangle \right\}, \quad \left( j = \overline{1, |\Phi_1|}; i = \overline{1, |\Phi_2|} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

Из совместности времён протекания процессов следует, что соответствующие вероятности  $p_j$  и  $p_i$  нужно перемножить, тогда получится ряд распределения вероятностей перехода 2–3 в виде (13).

$$\Phi_{23} = \left\{ \langle p_k^{23}, \tau_k^{23} \rangle \right\}, \quad \text{где } p_k^{23} = p_j^1 \cdot p_i^2, \tau_k^{23} = \tau_j^1 \quad (13)$$

При попадании процесса в состояние  $C_3$  запускается процесс передачи третьего пакета по первому КС, при этом продолжается процесс доведения первого пакета по второму КС. Отсюда распределение вероятности времени завершения передачи первого пакета по второму КС будет определяться из выражения (14), где знак (^) обозначает безусловное нахождение процесса в начальном состоянии перехода.

$$\widehat{\Phi}_{36} = \left\{ \langle \widehat{p}_k^{36}, \widehat{\tau}_k^{36} \rangle \right\}, \quad (14)$$

$$\text{где } \widehat{p}_k^{36} = p_k^{23}, \widehat{\tau}_k^{36} = \tau_i^2 - \tau_k^{23} \left( k = \overline{1, |\widehat{\Phi}_{36}|}; i = \overline{1, |\Phi_{23}|} \right)$$

Учитывая, что данный переход случится, если время его реализации будет меньше времени реализации перехода 3–4, соответствующего доведению третьего пакета по первому КС с рядом распределения  $\Phi_1$ , то в итоге распределение вероятностей времени перехода 3–6 будет иметь следующий вид (15).

$$\begin{aligned} \Phi_{36} &= \pi_{\tau^{36} < \tau^1} (\sigma_{\tau^{36} < \tau^1} (\Phi_1 \times \widehat{\Phi}_{36})) = \\ &= \left\{ \langle p_k^{36}, \tau_k^{36} \rangle \right\}, \quad \left( k = \overline{1, |\Phi_{36}|} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

После осуществления перехода 3–6, обозначающего тот факт, что первый пакет был передан по второму КС раньше, чем третий пакет был передан по первому КС, началась передача второго пакета по второму КС. Одновременно с этим продолжается передача третьего пакета по первому КС. Таким образом, из состояния  $C_6$  возможны переходы в состояния  $C_7$ ,  $C_8$  и  $C_9$  с соответствующими распределениями вероятностей времени их осуществления (16–18):

$$\begin{aligned} \widehat{\Phi}_{67} &= \left\{ \langle \widehat{p}_k^{67}, \widehat{\tau}_k^{67} \rangle \right\}, \\ \widehat{p}_k^{67} &= p_k^{36}, \\ \widehat{\tau}_k^{67} &= \tau_i^1 - \tau_k^{36} \left( k = \overline{1, |\widehat{\Phi}_{67}|}; i = \overline{1, |\Phi_{36}|} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\Phi_{68} = \Phi_2, \quad (17)$$



$$\begin{aligned} \Phi_{69} &= \pi_{\tau_{69}} (\sigma_{\tau_{69}=\tau^2} (\Phi_2 \times \widehat{\Phi}_{67})) = \\ &= \left\langle p_k^{69}, \tau_k^{69} \right\rangle, \quad (k = 1, |\Phi_{69}|) \end{aligned} \quad (18)$$

В исследуемой траектории процесса доведения 3-х пакетного сообщения предполагается осуществление перехода 6–7. Поэтому распределение условных вероятностей времени наступления этого события определяется из описанных выше соображений по выражению (19).

$$\begin{aligned} \Phi_{67} &= \pi_{\tau_{67}} (\sigma_{\tau_{67} < \tau^2} (\Phi_2 \times \widehat{\Phi}_{67})) = \left\langle p_k^{67}, \tau_k^{67} \right\rangle, \quad (19) \\ &(k = 1, |\Phi_{67}|) \end{aligned}$$

Таким образом, попадание процесса в состояние  $C_7$  предполагает доведение третьего пакета по первому КС и продолжение передачи второго пакета по второму КС. Завершение процесса доведения второго пакета по второму КС в этом случае обладает безусловными вероятностями времени его осуществления, распределение которых будет иметь следующий вид (20).

$$\begin{aligned} \Phi_{79} &= \left\langle p_k^{79}, \tau_k^{79} \right\rangle, \\ p_k^{79} &= p_k^{67}, \\ \tau_k^{79} &= \tau_i^2 - \tau_k^{67} \quad (k = 1, |\Phi_{79}|; i = 1, |\Phi_{67}|) \end{aligned} \quad (20)$$

Завершающим этапом передачи 3-х пакетного сообщения по ВМ для любой траектории движения процесса является передача третьего пакета по второму КС. Так как в данной траектории процесс попадает в состояние  $C_9$  путём доведения второго пакета по второму КС, то с момента завершения этого перехода начинается передача третьего

пакета. Поэтому распределение вероятностей времени этого перехода в данном случае равно  $\Phi_{9,10} = \Phi_2$ .

Таким образом, получены в виде множеств распределения вероятностей времён всех переходов процесса в соответствии с выбранной траекторией. Для получения общих ВВХ процесса доведения 3-х пакетного сообщения по ВМ по данной траектории необходимо руководствоваться следующими правилами:

1. Распределение вероятностей времён безусловных переходов ( $C_1-C_2, C_7-C_9, C_9-C_{10}$ ) определяется по выражению (21):

$$\begin{aligned} \Phi_{ij} &= \pi_{(\tau^{ik} + \tau^{kj})} (p^{ik} \cdot p^{kj}) (\Phi_{ik} \times \Phi_{kj}) = \\ &= \left\langle p_l^{ij}, \tau_l^{ij} \right\rangle, \quad (l = 1, |\Phi_{ij}|); \end{aligned} \quad (21)$$

2. Распределение вероятностей времени условных переходов ( $C_2-C_3, C_3-C_6, C_6-C_7$ ) определяется по выражениям (12–16).

Вычислив таким образом и сложив ряды распределения времени для всех траекторий реализации процесса, получим искомые характеристики.

Сформированный научно-методический аппарат исследования характеристик процесса доведения МПС по ВМ позволяет оценить среднее время доведения пакетов МПС в парциальных КС ВМ, а также вероятность их доведения за требуемое время.

Чтобы оценить вклад оперативности передачи пакета по одному из КС ВМ в общее среднее время, построим зависимости среднего времени и дисперсии времени доведения МПС по ВМ от среднего времени доставки одного пакета по второму КС ВМ. В качестве исходных данных (ИД) возьмём следующие параметры КС: вероятности доведения пакета и квитанции с одного повтора —  $P_{п}, P_{кв}$ , время доведения одного пакета и квитанции —  $t_{п}, t_{кв}$ , максимальное число попыток доведения пакетов и квитанции —  $k$ .

Таблица 1

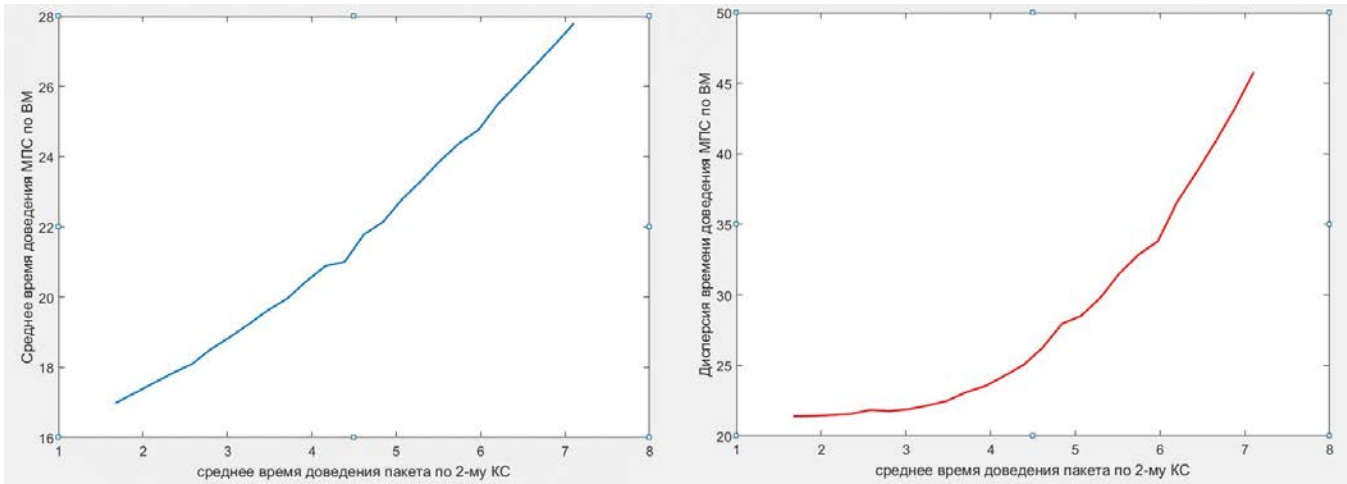
Параметры КС с высокой вероятностью битовой ошибки

Параметры	$P_{п}$	$t_{п}, c$	$P_{кв}$	$t_{кв}, c$	$k$
КС – 1	0,55	2	0,69	0,7	7
КС – 2	0,62	0,7...3,2	0,75	0,1...0,85	7

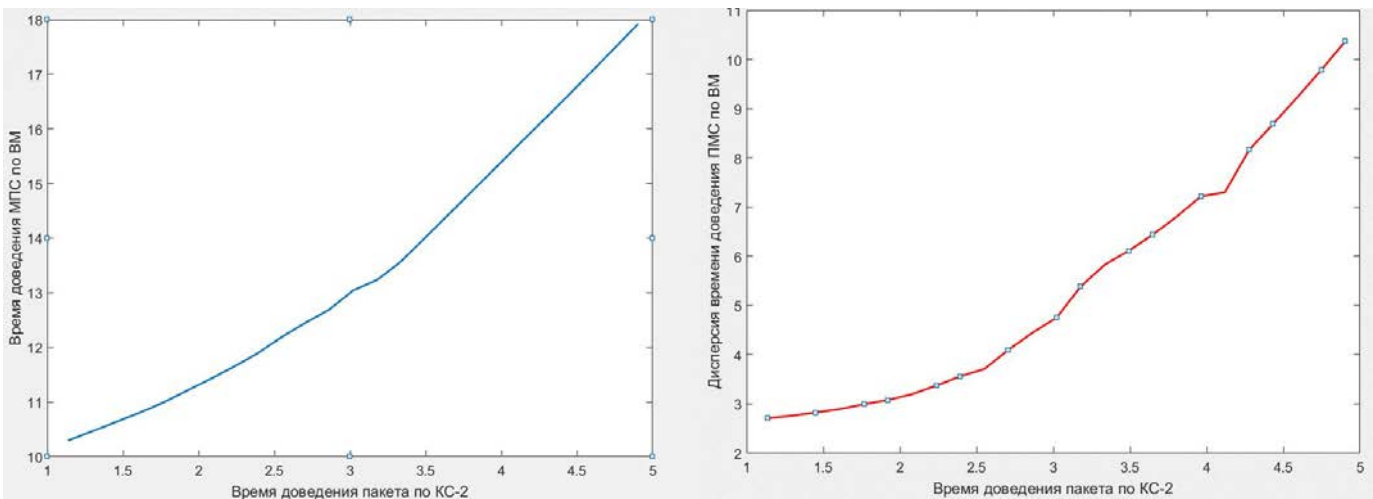
Таблица 2

Параметры КС с низкой вероятностью битовой ошибки

Параметры	$P_{п}$	$t_{п}, c$	$P_{кв}$	$t_{кв}, c$	$k$
КС – 1	0,9	2	0,95	0,7	5
КС – 2	0,85	0,7...3,2	0,92	0,1...0,85	5



**Рис. 9.** Среднее время ( $\bar{c}$ ) и дисперсия времени ( $\sigma^2$ ) доведения МПС по ВМ при высокой вероятности битовой ошибки



**Рис. 10.** Среднее время ( $\bar{c}$ ) и дисперсия времени ( $\sigma^2$ ) доведения МПС по ВМ при низкой вероятности битовой ошибки

Результаты расчётов среднего времени доведения и дисперсии времени доведения МПС по ВМ при ИД, приведённых в табл. 1 и 2, представлены на рис. 9 и 10. При этом в табл. 1 представлены параметры КС с высокой вероятностью ошибки на бит передаваемого сообщения, а в табл. 2 — параметры КС с низкой вероятностью битовой ошибки.

Расчёты были проведены при фиксированном среднем значении времени доведения пакета по КС-1, которое в первом случае составляет 4,8 с, а во втором случае 3,05 с.

Из анализа зависимостей на рис. 9 и 10 следует, что общее среднее время и дисперсия времени доведения МПС по ВМ в значительной степени зависит от характеристик

КС с худшим качеством (максимальным средним временем доведения пакета). Обобщая опыт исследований характеристик информационного обмена по виртуальным маршрутам и учитывая результаты полученных выше вычислений, индуктивно можно предположить, что среднее время доведения МПС по ВМ, содержащему различные по качеству транзитные КС, будет в основном определяться средним временем следования по КС с наихудшими параметрами, т.е. КС с максимальным средним временем передачи пакета. Поэтому, зная величины среднего времени и дисперсии времени передачи пакетов по всем транзитным КС ВМ, получить среднее время и дисперсию времени доведения МПС по ВМ можно по следующим выражениям (22–23):

$$\hat{T}_{\text{МПС}}^{ij} = L_{\text{МПС}} \cdot \bar{t}_{\Pi}^{km} + \sum_{n1 \in ik} \bar{t}_{\Pi}^{n1} + \sum_{n2 \in mj} \bar{t}_{\Pi}^{n2}, \quad (22)$$

$$\hat{D}_{\text{МПС}}^{ij} = L_{\text{МПС}} \cdot D_{\Pi}^{km} + \sum_{n1 \in ik} D_{\Pi}^{n1} + \sum_{n2 \in mj} D_{\Pi}^{n2}, \quad (23)$$

где  $L_{\text{МПС}}$  — количество пакетов МПС;

$i$  — начальное ЗПД ВМ;  $j$  — конечное ЗПД ВМ;  $km$  — парциальный КС ВМ с наибольшим средним временем доведения пакета;

$\bar{t}_{\Pi}^{km}, D_{\Pi}^{km}$  — среднее время и дисперсия времени передачи пакета по  $km$ -му КС ВМ между  $i$ -м и  $j$ -м ЗПД с наилучшим качеством ( $\bar{t}_{\Pi}^{km} = \max_{pr \in ij}(\bar{t}_{\Pi}^{pr})$ );

$\bar{t}_{\Pi}^{n1}, D_{\Pi}^{n1}$  — среднее время и дисперсия времени передачи пакета по КС ВМ до  $km$ -го КС ВМ;

$\bar{t}_{\Pi}^{n2}, D_{\Pi}^{n2}$  — среднее время и дисперсия времени передачи пакета по КС ВМ после  $km$ -го КС ВМ.

Для анализа погрешности оценки среднего времени и дисперсии времени доведения МПС по ВМ (временных характеристик) с помощью эмпирических выражений (22–23) по отношению к рассмотренному выше точному подходу были построены совместные графики зависимостей среднего времени и дисперсии времени доведения МПС при исходных данных табл. 1 и 2, представленные на рис. 11 и 12.

Из анализа представленных зависимостей следует, что, во-первых, при хорошем качестве КС ВМ эмпирические выражения (22–23) достаточно точно описывают временные характеристики процесса доведения МПС по ВМ, во-вторых, максимальная погрешность расчёта вре-

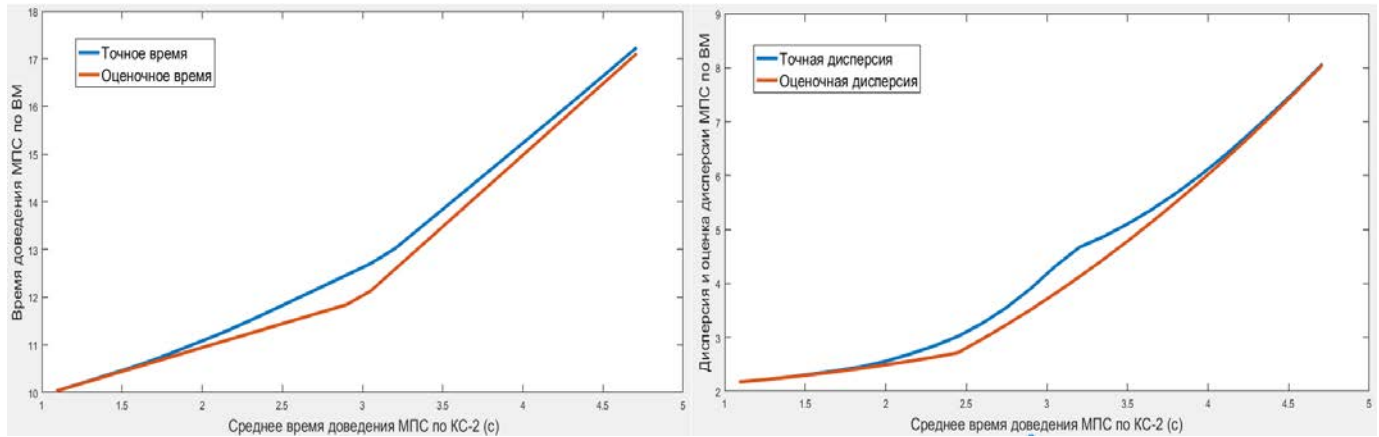


Рис. 11. Точные и оценочные значения среднего времени и дисперсии времени доведения МПС по ВМ при низкой вероятности битовой ошибки

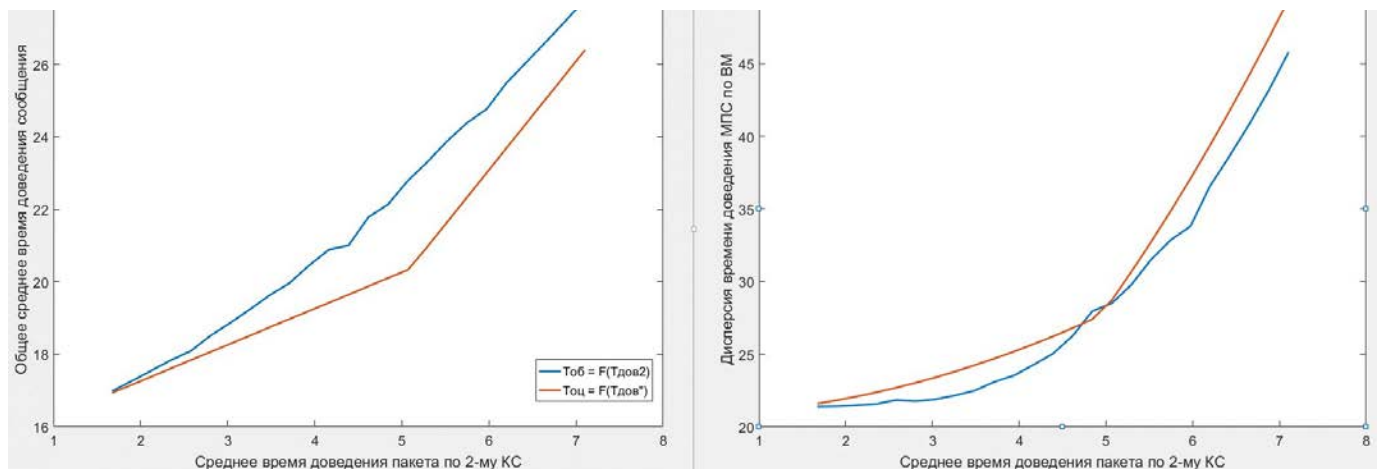


Рис. 12. Точные и оценочные значения среднего времени и дисперсии времени доведения МПС по ВМ при высокой вероятности битовой ошибки

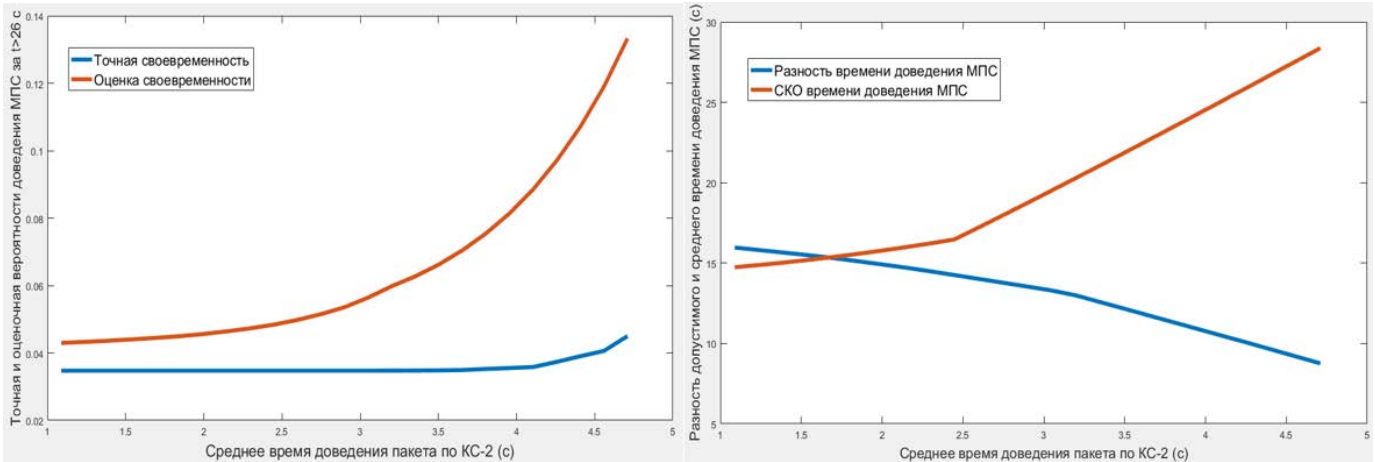


Рис. 13. Точные и оценочные значения своевременности доведения МПС по ВМ

менных характеристик исследуемого процесса по выражениям (22–23) возникает при близком значении качества КС ВМ и при хорошем качестве КС не превышает 5% от времени доведения МПС.

Для оценки своевременности (ВВХ) доведения МПС по ВМ, т.е. вероятности доведения МПС за допустимое время, можно воспользоваться неравенством Чебышева [16]. При этом, в случае, когда суммарная вероятность времени доведения МПС меньше единицы, целесообразно воспользоваться выражением (24).

$$\hat{P}(t_{\text{МПС}} \leq T^{\text{доп}}) \geq \left[ 1 - \left( \frac{\hat{D}_{\text{МПС}}}{(T^{\text{доп}} - \hat{T}_{\text{МПС}})^2} \right) \right] \cdot \left( \sum_i P_i(t_i) \right). \quad (24)$$

Графики зависимости вероятности и оценки вероятности недоставления МПС за требуемое время, а также разности среднего времени и десяти значений среднеквадратического отклонения (СКО) времени доведения от времени передачи пакета по КС-2 представлены на рис. 13.

Из анализа графиков следует, что достаточно точное приближение оценки нижней границы вероятности превышения допустимого времени доведения МПС наблюдается в случаях, когда разница допустимого времени и среднего времени доведения МПС не меньше десяти СКО времени его доведения.

Предложенный реляционно-операторный метод определения ВВХ процессов доведения МПС по ВМ позволяет исследовать информационный обмен (ИО) в пакетном режиме с произвольными протоколами КС, однако обладает значительной ресурсозатратностью ЭВМ, что позволяет его использовать в основном на стадии планирования сети.

Поэтому для оперативного определения характеристик своевременности и оперативности ИО абонентов сети передачи данных без большого ущерба для точности можно воспользоваться приближенными вычислениями по выражениям (22–24).

### Литература

1. Самуйлов К.Е. Методы анализа и расчета сетей ОКС 7: Монография. М.: Изд-во РУДН, 2002. 292 с.
2. Дроздова В.Г. Анализ вероятностно-временные характеристики мобильных сетей WiMAX // Телекоммуникации. 2010. № 4. С. 29–36.
3. Lindberger K. Dimensioning and design methods for integrated ATM networks // Proc. of 14-th International Teletraffic Congress, Antibes Juan-les-Pins, 6–11 June 1994. ITC, 1994. Pp. 897–906.
4. Willmann G., Kuhn P.J. Performance Modeling of Signaling System No.7 // IEEE Communications Magazine. 1990. Vol. 28. Issue 7. Pp. 44–56.
5. Олифер В.Г. Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов. 4-е изд. СПб.: Питер, 2012. 958 с.
6. Цимбал В.А., Косарева Л.Н., Потапов С.Е., Тоускин В.Е. Автоматизированный синтез конечных марковских цепей описывающих процесс доведения многопакетного сообщения в VPN MPLS // Сборник докладов 69 Международной конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий» (Москва, 21–23 мая 2014 г.). М.: БРИС–М, 2014. Т. 4. № 2. С. 112–115.
7. Цимбал В.А., Тоускин В.Е., Потапов С.Е., Сорочкин О.М., Лягин М.А., Бережной А.А., Крючков Н.В., Холтуп В.В. Автоматизированный синтез поглощающей



конечной марковской цепи, описывающей доведение многопакетного сообщения в соединении «точка-точка» системы передачи данных и исследование его оперативности // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2016. № 4 (24). С. 59–65.

8. *Орехов С. Е.* Метод анализа временных характеристик неоднородной поглощающей конечной марковской цепи с непостоянными по длительности шагами переходов // Теория и техника радиосвязи. 2014. № 3. С. 32–40.

9. *Цимбал В. А., Тоускин В. Е., Лягин М. А.* Нахождение границ применимости протокола типа X.25 с кумулятивной квитанцией в асимметричном радиотракте передачи данных при требуемой достоверности и оперативности доставки многопакетного сообщения // Фундаментальные исследования. 2017. № 12–1. С. 143–148.

10. *Цимбал В. А.* Информационный обмен в сетях передачи данных. Марковский подход: Монография. М.:

Вузовская книга, 2014. 144 с.

11. *Казаков В. А.* Введение в теорию марковских процессов и некоторые радиотехнические задачи. М.: Советское радио, 1973. 232 с.

12. *Кемени Д. Дж., Снелл Дж. Л.* Конечные цепи Маркова: пер. с англ. М.: Наука, 1970. 272 с.

13. *Потапов С. Е.* Исследование процесса передачи информации по виртуальным маршрутам в радиосети системы связи с подвижными объектами // Теория и техника радиосвязи. 2019. № 3. С. 11–23.

14. *Тихонов В. И., Миронов М. А.* Марковские процессы М.: Советское радио, 1977. 488 с.

15. *Тарасов В. Г.* Основы теории автоматизированных систем управления. Воронеж: Изд-во ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1988. 437 с.

16. *Вентцель Е. С.* Теория вероятностей. М.: Наука, 2003. 564 с.

## RELATIVE-OPERATIVE METHOD OF MATHEMATICAL MODELING TRANSMISSION OF MULTI-PACKAGE MESSAGES ALONG THE VIRTUAL ROUTES OF THE RADIO COMMUNICATION NETWORK

**SERGEY E. POTAPOV,**

Serpukhov, Russian, 41kaf\_rabota@mail.ru

**KEYWORDS:** probability-time characteristics; data transmission network; channels of connection; generating functions; multicast messages; end chains of Markov.

### ABSTRACT

The work analyzes the basic methods of mathematical modeling of the process of delivering messages along virtual routes in data transmission networks with communication channel protocols providing for the procedure for acknowledging message packets. Based on the revealed regularities of information transfer processes, a new approach has been formed to determine the probabilistic-temporal characteristics of information exchange along virtual routes of a packet-switched data network. The aim of the research is to develop a mathematical apparatus for the correct description of information exchange processes with the property of aftereffect. The research methodology is based on the foundations of graph theory, probability theory, relational algebra, vector analysis. As a result of the study, a new methodological approach to the mathematical modeling of

information exchange processes in data transmission networks was formed, taking into account the features of multicast messages on virtual routes, which has sufficient commonality for its development in processes in other fields of science and technology, with the property of aftereffect. It was also established that the timeliness of information exchange over data networks with packet switching under certain conditions with sufficient juiciness can be estimated using simple empirical expressions, also obtained as a result of the study. In addition, the work shows that the greatest error in determining the efficiency of communicating information on virtual routes occurs with the same average time of transmission of message packets on partial sections of the route. It is advisable to apply the results of the research at the design stage of data transmission networks containing commu-



tion channels with unstable information characteristics, as well as in the network software of the switching equipment of such networks to assess the suitability and determine the preference of a particular route for bringing information messages between subscribers.

## REFERENCES

1. Samuilov K.E. *Metody analiza i rascheta setej OKS7: Monografiya* [Methods of analysis and calculation of networks ACS7: Monograph]. Moscow: RUDN Publ., 2002. 292 p. (In Russian)
2. Drozdova V.G. Analysis of probabilistic-time characteristics of mobile WiMAX networks. *Telekommunikatsii* [Telecommunications]. 2010. No. 4. Pp. 29-36. (In Russian)
3. Lindberger K. Dimensioning and design methods for integrated ATM networks. *Proc. of 14-th International Teletraffic Congress, Antibes Juan-les-Pins, 6-11 June 1994*. ITC, 1994. Pp. 897-906.
4. Willmann G., Kuhn P.J. «Performance Modeling of Signaling System No. 7. *IEEE Communications Magazine*. 1990. Vol. 28. Issue 7. Pp. 44-56.
5. Olifer V.G. Olifer N.A. *Komp'yuternye seti. Principy, tehnologii, protokoly* [Computer networks. Principles, technologies, protocols]. 4th ed. St. Petersburg: Piter, 2012. 944 p. (In Russian)
6. Tsimbal V.A., Kosareva L.N., Potapov S.E., Toiskin V.E. The automat synthesis final the markovskikh of chains finishings of the multipackage message describ process in VPN MPLS. *Proc. of International conference "The radio-electronic devices and systems for the infocommunication technologies (REDS-2014)", Moscow, 21-23 May 2014*. Moscow: BRIS-M, 2014. Vol. 4. No. 2. C. 112-115. (In Russian)
7. Tsimbal VA, Toiskin V.E., Potapov S.E., Sorokin OM, Lyagin M.A., Berezhnoy A.A., Kryuchkov N.V., Khoptar V.V. The automated synthesis of the absorbing finite Markov chain describing delivery of the multipacket message in point-to-point line of data transmission system, and investigation of its operational efficiency. *Radio and telecommunication systems*. 2016. No. 4 (24). Pp. 59-65. (In Russian)
8. Orekhov S.E. The analysis method of the heterogeneous Markov

finite chain time performance based on changeable crossing steps. *Radio Communication Theory and Technology*. 2014. No. 3. Pp. 49-57. (In Russian)

9. Tsimbal V.A., Toiskin V.E., Lyagin M.A. Finding of borders of applicability of the report of type X.25 with the cumulative receipt in the dissymmetric radio path of data transmission at demanded reliability and efficiency of delivery of the multipackage message. *Fundamental research*. 2017. No. 12-1. Pp. 143-148. (In Russian)
10. Tsimbal V.A. *Informacionnyj obmen v setjah peredachi dannyh. Markovskij podhod: Monografiya* [Information exchange in data transmission networks. Markov approach: Monograph]. Moscow: Vuzovskaja kniga, 2014. 144 p. (In Russian)
11. Kazakov V.A. *Vvedenie v teoriju markovskih processov i nekotorye radiotekhnicheskie zadachi* [Introduction to the theory of Markov processes and some radio engineering problems]. Moscow: Sovetskoe Radio, 1973. 232 p. (In Russian)
12. Kemeny J.J., Snell J.L. *Finite Markov chains*. 1st ed. Springer, 1960. 226 p.
13. Potapov S.E. Research of process of information transfer on virtual routes in the radio network of the communication system with mobile objects. *Radio Communication Theory and Technology*. 2019. No. 3. Pp. 11-23. (In Russian)
14. Tikhonov V.I., Mironov M.A. *Markovskie processy* [Markov processes]. Moscow: Sovetskoe Radio, 1977. 488 p. (In Russian)
15. Tarasov V.G. *Osnovy teorii avtomatizirovannyh sistem upravlenija* [Fundamentals of the theory of automated control systems]. Voronezh: Voenno-vozdushnaja akademija imeni N.E. Zhukovskogo Publ., 1988. 437 p. (In Russian)
16. Wentzel E.S. *Teorija verojatnostej* [Probability Theory]. Moscow: Nauka, 2003. 564 p. (In Russian)

## INFORMATION ABOUT AUTHOR:

Potapov S.E., PhD, Senior lecturer of the Branch of Military Academy of Strategic Rocket Forces.

---

**For citation:** Potapov S.E. Relative-operative method of mathematical modeling transmission of multi-package messages along the virtual routes of the radio communication network. *H&ES Research*. 2019. Vol. 11. No. 6. Pp. 61-73. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10296 (In Russian)



doi: 10.24411/2409-5419-2018-10297

# МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБОСНОВАНИЯ СИСТЕМЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ УПРАВЛЕНИЕМ РАКЕТНЫХ ВОЙСК И АРТИЛЛЕРИИ В ОПЕРАЦИЯХ

**НОСОВ**

**Михаил Иванович<sup>1</sup>**

**БОРУНОВ**

**Денис Николаевич<sup>2</sup>**

## АННОТАЦИЯ

Решение сложной научно-технической задачи по оценке эффективности информационной системы ракетных войск и артиллерии в операциях должна базироваться на единых методологических принципах и учитывать систему показателей, отражающие состояние, структуру и развитие информационной системы, в том числе отдельных её компонентов, обеспечивающих функционирование системы ракетных войск и артиллерии, её роль в процессе принятия решений в операциях. Предлагаемые подходы по формированию показателей информационной системы для поддержки принятия решений управлением ракетных войск и артиллерии в операциях учитывают тенденции развития современных информационных технологий направленные на придание интеллектуальных свойств создаваемых информационных систем. Современные требования к количественным и качественным характеристикам обеспечения процессов управления ракетных войск и артиллерии в операциях требуют глубокого и разностороннего анализа информационных потоков и связей между должностными лицами органов управления. Исходя из этого предлагается оценить количественные и качественные характеристики информационных потоков и связей между должностными лицами органов управления в заданный интервал времени с учетом специфики выполнения задач через аппарат теории графов с целью повышения эффективности информационной системы ракетных войск и артиллерии. Предложен комплексный критерий системной эффективности информационной системы для поддержки принятия решений управлением ракетных войск и артиллерии в операциях, позволяющий дать совокупную, системную оценку подсистем и объектов информационной системы ракетных войск и артиллерии, находящихся на любом этапе жизненного цикла. Установлено, что с учетом специфики создания и функционирования информационной системы ракетных войск и артиллерии требуется количественная оценка и обоснование перспективной информационной системы при решении задач управления качеством на всех этапах её жизненного цикла. К числу таких задач относятся планирование, прогнозирование и обоснование перспективной информационной системы ракетных войск и артиллерии в процессе создания и дальнейшего её развития, разработки технических заданий на создание и модернизацию информационной системы ракетных войск и артиллерии.

## Сведения об авторах:

<sup>1</sup>д.т.н., доцент, старший научный сотрудник Михайловской военной артиллерийской академии, г. Санкт-Петербург, Россия, mikhail.nosov.64@mail.ru

<sup>2</sup>к.т.н., начальник научно-исследовательского отдела Михайловской военной артиллерийской академии, г. Санкт-Петербург, Россия, denbor.07@mail.ru

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** интегральная оценка система показателей; количественная оценка; критерии качества информационных систем, сбалансированная система показателей.

**Для цитирования:** Носов М.И., Борунов Д. Н. Методологические основы обоснования системы показателей информационной системы для поддержки принятия решений управлением ракетных войск и артиллерии в операциях // Научное издание в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 6. С. 74–84. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10297



## Введение

Современная деятельность органов управления ракетных войск и артиллерии (РВиА) немыслима без эффективного информационного обеспечения, которое состоит в формировании и выдаче актуальной, достоверной информации, достаточной для эффективных управленческих воздействий.

Кроме того, в условиях изменяющихся форм и методов ведения вооруженной борьбы существует и нарастает отставание возможностей оперативного изменения конфигурации информационной системы (ИС) РВиА от динамики изменения требований к функционированию ИС РВиА в операциях. Данное отставание входит в жесткое противоречие с требованиями обеспечения качества управления соединениями, частями и организациями РВиА в операциях.

Потребность в информационных ресурсах деятельности органов управления (ОУ) РВиА во многом определяются спецификой области совместной деятельности подсистем Вооруженных Сил Российской Федерации, а также с комплексами средств автоматизации (КСА) других силовых и взаимодействующих министерств, ведомств и структур [1–2].

Оценка эффективности информационной системы РВиА в операциях является крайне сложной задачей ввиду многообразия интересов пользователей. Для органов военного управления ВС РФ, в том числе РВиА, доминирующим принципом является «знать только необходимое»: независимо от занимаемой должности в организации должностное лицо должен получать только ту информацию, которая ему необходима для выполнения его обязанностей. Следует четко установить правила распространения информации (политику информационного обеспечения и — как ее неотъемлемую составляющую — политику информационной безопасности), с тем, чтобы обеспечить необходимую осторожность, но и не отказывать в информации тем, кто в ней нуждается [1].

Анализ тенденций развития современных информационных технологий показывает, что одним из основных направлений является направление, связанное с приданием интеллектуальных свойств создаваемым информационным системам. Инструментарий должностных лиц ОУ РВиА в операциях должен обогащаться современными средствами, учитывающими специфику мыслительного процесса, адаптирующимися к потребностям пользователя.

Следовательно, построение системы показателей синтеза ИС для поддержки принятия решений управлением РВиА в операциях реализация в практике создания и применения ИС основывается на единых методологических принципах и необходимо учитывать следующие [1–5]:

1. Система показателей должна отражать состояние, структуру и развитие ИС, в том числе отдельных её компонентов, обеспечивающих функционирование системы; её роль в процессе принятия решений РВиА в операциях и воздействие на управленческие процессы. В этой связи обоснованным является выделение обобщающих показателей и частных показателей, которые позволяют дать прагматическую оценку и провести анализ полезности информации в процессе управления РВиА в операциях.

2. Систему показателей следует формировать так, чтобы она была применима для различных уровней управления РВиА в операциях.

3. Важно обеспечить единство между отдельными элементами системы, между общими и частными показателями. Наличие и выявление различного рода взаимосвязей между показателями системы выступает важнейшим условием анализа динамики, факторов и эффективности использования ИС ОУ РВиА.

4. Особо необходимо отметить сочетание количественных и качественных оценок. Это обусловлено стратегией исследования (общей логики проведения исследования, включая описание цели, задач и основных путей их реализации), а также методами сбора информации.

Количественные и качественные показатели дают возможность адекватно обобщить результаты, полученные в ходе исследования, в частности, оценить уровень, структуру, динамику развития ИС РВиА в операциях, эффективность её использования, а также изучить степень распространения систем и отдельных ее компонентов среди ОУ РВиА, различающихся по сферам деятельности, масштабам и т. д.

## 1. Основные направления повышения эффективности информационной системы органов управления РВиА

Результаты проведенных исследований показали, что для одной и той же управляемой системы могут быть созданы самые различные информационные системы, внешне вполне удовлетворительно выполняющие свои функции, но на самом деле качественно отличающиеся друг от друга. Тем более затруднительно сопоставлять системы для разных объектов.

Информационная система РВиА, как многоуровневая иерархическая структура, обладает следующими свойствами:

- более высокий уровень имеет дело с более широкими аспектами поведения системы в целом;
- время преобразования входных компонент в выходные увеличивается с повышением уровня управляющей подсистемы;



– более высокий уровень иерархической структуры имеет дело с более медленными, устойчивыми, инерционными аспектами и параметрами поведения системы;

– с повышением уровня подсистемы увеличивается удельный вес информации и усиливается ее роль в функциональной деятельности системы.

Из сказанного следует, что чем выше уровень звена управления, тем сложнее механизмы принятия управленческих решений и процедуру их реализации. Так, например, в системе выделяются три основные группы задач [5–6]:

- задачи на разделение (декомпозицию);
- задачи распределения;
- задачи на объединение (композицию) частей системы.

Задачи на разделение (декомпозицию) системы обусловлены исходя из общесистемных свойств, выделение (формирование) элементарного состава, частей, подсистем системы.

Распределение задач выполнено по всем элементам системы исходя из функций, задач, ресурсов.

Решение задач на объединение (композицию) элементов частей системы предполагает установление связей, взаимных отношений между элементами и частями системы и способов их взаимодействия и на этой основе формирование целого из частей.

В связи с этим, основным направлением повышения эффективности информационной системы органов управления РВиА является автоматизация процессов сбора, обобщения, передачи и хранения информации.

Физическая распределенность и логическая несовместимость систем и комплексов при явных требованиях совместной работы порождают актуальную проблему их интеграции с целью обеспечения качества функционирования ИС РВиА. При этом должно учитываться, что системные требования к качеству функционирования информационных систем являются взаимосвязанными и должны контролироваться с помощью показателей, формируемых в зависимости от угроз, возможностей их возникновения и сценариев их потенциальной реализации [3–4].

В современных условиях качество функционирования информационной системы управления РВиА на каждом уровне можно существенно повысить за счет рационального использования современных информационных технологий. В первую очередь речь идет о развитии информационных технологий и моделей принятия решений, которые позволяют создавать интегрированные системы инструментальной поддержки принятия решений [1, 6–7].

При выполнении функций автоматизированного управления предполагается достигать результат не только за счёт существенного повышения значений таких основных показателей как оперативности, устойчивости, непре-

рывности и скрытности, но и обоснованности управленческих решений.

В данном контексте уместно указать на основные факторы, оказывающие влияние на обоснованность принятия решения.

Во-первых, объём и ценность располагаемой информации. Для успешного принятия решения главным является не объём информации, а ценность, определяемая уровнем профессионализма, опыта, интуицией должностных лиц. Использование качественной информации производится на основе формирования и прогнозирования показателей, характеризующих в динамике возможности системы РВиА. Обеспечение ДЛ ОУ РВиА качественной информацией, характеризующей параметры «входа», «выхода», «внешней среды» и «процесса» системы разработки решений, имеет ключевое значение в принятии решений.

Во-вторых, автоматизация процесса разработки и реализации решений, в том числе процесса сбора и обработки информации и процесса принятия решений. Мощным фактором, активизирующим процессы принятия и реализации решения, выступают современные информационные технологии. Это требует высокого уровня культуры в области математики и программирования, технологии использования инструментальных и технических средств.

## **2. Количественные и качественные показатели информационной системы ракетных войск и артиллерии**

Несмотря на специфику создания и функционирования ИС РВиА в операциях требуется количественная оценка и обоснования перспективной ИС при решении задач управления качеством на всех этапах её жизненного цикла. К числу таких задач относятся: планирование, прогнозирование и обоснование перспективной ИС РВиА в процессе создания и дальнейшего её развития; разработка технических заданий на создание и модернизацию ИС РВиА; установление соответствия разработанного (модернизированного) образца (изделия) требованиям, заложенным в техническом задании; определение оперативно-технического уровня создаваемых (модернизируемых) подсистем, комплексов и ИС РВиА в целом; выбор оптимального варианта построения ИС РВиА; разработка нормативной документации на систему; контроль качества подсистем и комплексов ИС РВиА; сбор и анализ информации по качеству функционирования подсистем и комплексов ИС РВиА; доработка нормативной документации подсистем и комплексов ИС РВиА по результатам этого анализа и т.д.

Для интегральной оценки в виде некоторого обобщенного количественного показателя степени соответствия качества ИС РВА поставленным при ее создании



задачам, сравнения уровня разработки различных по значению систем, сопоставления с тенденциями и уровнем научно-технического прогресса выделим показатель научно-технического уровня (НТУ) ИС РВиА. Оценка НТУ проводится на стадиях планирования, разработки, внедрения и функционирования ИС.

На стадии планирования определяют плановый НТУ исходя из анализа тенденций изменения частных показателей НТУ, отражающих ранее решавшиеся задачи управления и предполагаемые для решения в планируемом периоде.

На стадии разработки проектов оценка НТУ используется для уточнения проектного уровня системы, сопоставления выполненных проектов с заданным проектным уровнем, выбора методов проектирования, обеспечивающих достижение заданного НТУ, определения необходимых для повышения НТУ научно-исследовательских работ. Значение НТУ задаётся исходя из тенденций развития форм и способов применения группировок войск (сил) в соответствии с существующими тенденциями и факторами изменения характера вооруженной борьбы, а также новых информационных технологий, под влиянием научно-технического прогресса.

Следовательно, оценка НТУ и ее использование служат одним из способов упорядочения планирования и контроля за разработкой и боевым применением ИС РВиА на всех стадиях и этапах ее жизненного цикла. По существу, оценка НТУ ИС РВиА тождественна выбору параметров  $P$  обеспечивающих максимум функционала  $F(p)$ , отражающего НТУ.

При создании ИС РВиА на начальных стадиях (планирование, проведение НИР и др.), как правило, заказчик и разработчик оперируют относительно небольшим количеством параметров функционала  $F_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ . Они, как показывает анализ, в своей основе являются агрегированными, т.е. некоторыми функциями других параметров более низкого уровня  $P_s$ ,  $s = 1, 2, \dots, N$  причем  $n > N$ . При этом некоторые характеристики ИС РВиА являются типичными для ряда входящих в нее подсистем и комплексов, однако, в зависимости от особенностей создаваемых ПАК, могут возникать и специфические целевые функционалы — параметры  $f_i \in F_i$ .

Опыт проведения работ показал, что выбираемые функционалы для оценки НТУ зависят от небольшого числа существенных переменных, поэтому параметры ИС РВиА целесообразно разделить на две группы:  $p = p' + p''$ , где  $p'$  — вектор существенных параметров небольшой размерности, а  $p''$  — вектор всех остальных параметров. В этом случае зависимость  $F_i(p)$  будет иметь вид  $F_i(p) = F_i(p', \varepsilon p'')$ , где  $\varepsilon$  — некоторый мало весомый параметр, компенсирующий ошибку разделения вектора  $p$  на два вектора.

На начальных стадиях создания ИС РВА при оценке только существенных параметров можно положить, что  $F_i(p', \varepsilon p'') \approx F_i(p', 0)$ . При этом, в результате решения задачи  $F_i(p) \rightarrow \max$  могут быть найдены некоторые оценки  $F_{i0} = F_i(p_i)$ , характеризующие максимальные возможности ИС РВиА, обеспечиваемые современным уровнем развития науки и техники.

Выражение  $W(p, \lambda) = \max \lambda_i [F_{i0} - F(p)] / F_{i0}$  показывает, насколько создаваемые подсистемы, комплексы и ИС РВА в целом хуже идеальной (базовой), имеющей максимально достижимый НТУ. Здесь  $\lambda_i$  — оценка важности комплекса параметров ИС РВиА, отображаемых функционалом,  $0 \leq \lambda \leq 1$ . При  $\lambda=1$  зависимость  $W(p, 1) = \max \frac{F_{i0} - F(p)}{F_{i0}}$  показывает, по каким комплексам параметров создаваемые ПАК уступают идеальным.

Компоненты вектора  $\lambda$  — положительные числа,  $\lambda^k$  определяет относительную значимость  $k$ -го параметра для решения задач, поставленных перед разработчиками ИС РВиА. Чем больше величина  $\lambda^k$ , тем важнее характеристика  $F_k$ . Таким образом, можно считать, что вектор  $\lambda$  характеризует реальную концепцию развития ИС. Используя функционал  $W(p, \lambda)$  и определяя  $W(p, \lambda) \rightarrow \min$  можно найти  $p'$  как функцию  $\lambda$ . Поскольку при минимизации функционала  $W(p, \lambda)$  каждому значению  $\lambda$  поставлено в соответствие определенное значение  $p$ ,  $F(p)$  также может рассматриваться как функция от вектора  $\lambda$ . Поэтому при создании программно-аппаратных комплексов (ПАК) объектов ИС в начале необходимо определить характеристики вектора  $\lambda = \lambda_1$  затем, минимизируем функционал  $W(p', \lambda)$  и определим  $p'_1 = p'_1(\lambda)$ , что по существу соответствует выбору концепции построения ИС РВиА. После проведения экспертизы выбранной концепции ИС РВиА создается более детальное представление о ней. В то же время, в случае отрицательного результата, изменяя концепцию (вектор  $\lambda$ ), можно рассматривать детально новые концепции, провести их экспертизу и получить желаемый результат.

Таким образом, оценка НТУ ИС РВиА представляет собой итеративный процесс выбора концепции формирования ИС для поддержки принятия решений управлением РВиА в операциях, оценки функциональных характеристик отдельных компонентов и всей системы с целью нахождения  $W(p, \lambda) \rightarrow \min$ .

Одним из значимых условий является возросшая потребность в информации для целей управления РВА в операциях и бурное развитие информационных процессов, что способствовало выдвигению на первый план создание компонентов её инфраструктуры. Информационная инфраструктура охватывает вычислительную технику, средства коммуникации, методическое и программное обеспечение, технологии, вспомогательные виды деятельности [4].

Из сказанного следует, что одной из важнейших технологических задач при выборе проектных вариантов информационно-технологических продуктов — обеспечение совместимости. Для потребителей совместимость означает возможность использования в одном комплексе различных устройств и программных продуктов и свободного обмена различной информацией.

Усилия по стандартизации программных, аппаратных и информационных компонентов обеспечивают унификацию внешних форм, но не их содержания. Благодаря этому можно изменять конфигурации программно-технических средств и обеспечивать передачу и хранение разнообразной информации. Именно совместимость обеспечивает возможность межплатформенных переходов при реконструкции информационных систем.

Решение задачи программно-аппаратной совместимости требует полного соответствия и взаимной сопряженности компонентов телефонии, обработки данных, средств ввода-вывода информации, передачи данных, хранения и преобразования, аудио- и видеоинформации.

При определении НТУ могут быть использованы различные показатели, методы и процедуры оценки, если они отвечают условиям создания и боевого применения ИС РВиА в операциях.

При этом оценка НТУ должна быть основана на получении численных значений показателей, определяющих степень реализации целей функционирования ИС РВиА в операциях, на вычислении обобщенных оценок и их сравнении.

Состав номенклатуры количественных и качественных показателей (НККП), используемых для оценки НТУ, в зависимости от особенностей подсистем и комплексов

ИС РВиА и целей их оценки может изменяться от ограниченного количества до комплекса иерархически связанных показателей, характеризующих свойства различных компонентов информационной системы.

На наш взгляд, при выборе НККП для оценки НТУ целесообразно использовать систему, имеющую четыре уровня иерархии. Первый уровень составляют факторы количества и качества, применяемые для получения интегральных оценок по группам показателей. На втором уровне каждому фактору соответствует ряд показателей количества и качества, которые относятся к разряду комплексных. На третьем — каждый показатель определяется метриками, отражающие отдельные характеристики программного продукта, процесса, проекта. В свою очередь метрики состоят из оценочных элементов, которые являются единичными показателями количества и качества (4-й уровень), причем число оценочных элементов, входящих в метрику, не ограничено. С помощью метрик можно дать количественную или качественную оценку качества информационной системы. Различают следующие виды метрик и шкал для измерения критериев:

Первый тип — метрики, которые используют интервальную шкалу, характеризуемую относительными величинами или реально измеряемыми физическими показателями, например, временем наработки на отказ, вероятностью ошибки, объемом информации и др.

Второй тип — метрики, которым соответствует порядковая шкала, позволяющая ранжировать характеристики путём сравнения с опорными значениями.

Третий тип — метрики, которым соответствуют номинальная или категорированная шкала, определяющая наличие рассматриваемого свойства или признака

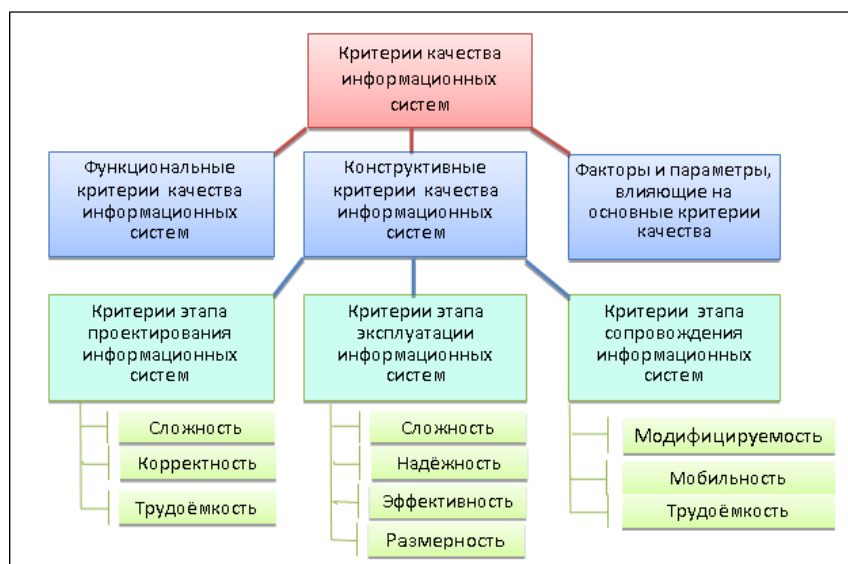


Рис. 1. Модель классификации критериев качества информационных систем

у рассматриваемого объекта без учета градаций по этому признаку.

Развитием иерархического подхода является представленная на рис. 1 модель классификации критериев качества информационных систем.

С помощью функциональных критериев оценивается степень выполнения информационной системой основных целей или задач. Конструктивные критерии предназначены для оценки компонент информационной системы, не зависящих от целевого назначения.

С учетом выявленных свойств, оказывающих существенное влияние на НТУ, целей и задач, стоящих перед ИС РВиА, возможностей оценки её свойств с достаточной точностью при ограниченных затратах при синтезе ИС РВиА в операциях целесообразно использовать следующую группу показателей: оперативные, функционального назначения, системотехнические, технологичности, эргономические, эстетические, унификации и стандартизации, наукоёмкости.

Предлагаемая НККП обеспечивает их совместимость с показателями технических, информационных и программных средств, используемых в составе ИС; с военно-технико-экономическими показателями оценки функционирования ПАК объектов управления, а также учитывает требования руководящих НД, регламентирующих состав показателей технического уровня и качества изделий, входящих в состав ИС РВиА.

С целью оценки элементов информационного обеспечения управленческой деятельностью ДЛ ОУ РВиА в операциях, принимающим решение в сложных условиях для полного и объективного анализа необходимо выделить группу показателей для оценки процесса информацион-

ного обеспечения управленческой деятельности ДЛ ОУ РВиА в операциях (рис. 2).

Предлагаемый подход к определению эффективности системы базируется на подходах к оценке интеллектуального капитала (через определение ценности системы для удовлетворения потребностей ДЛ ОУ РВиА в информации, их стремления получить больше информации о множестве объектов для реализации собственных функциональных задач, совместное рассмотрение оперативных задач и совершенствование системы управления).

Поэтому особое внимание необходимо уделять оценкам потребности и полноты информационного обеспечения управленческих решений РВиА в операциях, затрат на информационное обеспечение, выгод (изменений) в системе РВиА, связанных с внедрением и использованием ИС для поддержки принятия решений управлением РВиА в операциях.

Сбалансированная система показателей, включающая в себя группы показателей для оценки процесса информационного обеспечения управленческой деятельности ДЛ ОУ РВиА в операциях по нескольким направлениям одновременно, дает возможность комплексно отражать уровень ИС РВиА в операциях.

Рассматривая ИС для поддержки принятия решений управлением РВиА в операциях, где в процессе управления задействованы практически все должностные лица ОУ РВиА, можно сказать, что структура информационных потоков сказывается на качестве деятельности ОУ РВиА в целом.

Анализ эффективности компонентов ИС РВиА показал, что одной важной проблемой является обмен информацией внутри ОУ РВиА. Это объясняется наличием «информационных провалов» между должностными лицами



Рис. 2. Модель классификации критериев качества информационных систем



и управлениями, отделами (службами) управления из-за увеличения издержек по операциям в основных управленческих процессах.

Если на уровне должностное лицо — должностное в рамках одного управления (отдела, службы) обмен информацией, как правило, налажен, то на уровне управления (отдела, службы) — управления (отдела, службы) под проблема «информационных провалов» стоит более остро. Например, заявка или вопрос, переданный ДЛ в другое управление, часто не обрабатывается в указанные сроки. Также ДЛ сложно отследить факт приема переданного сообщения коллегами и начало/окончание его обработки [11].

Следует отметить оперативность сбора и обработки информации ДЛ ОУ РВиА. По результатам анализа личных коммуникаций выявлено, что сам процесс коммуникаций по сбору и обработке информации занимает до 40% времени ДЛ ОУ РВиА, на запись задачи, выполнение расчётов — 15–20% и на творческо-аналитическую деятельность — 15–20%, остальные временные затраты (подготовительный этап, обсуждение проблемы, окончание коммуникаций) — до 20% — ненужная потеря времени.

Поэтому важным показателем качества информационной системы является ее оптимальная структура. Количественную оценку ИС РВиА можно определить через показатель структурной компактности, характеризующий структурную близость источников информации, то есть органы управления. В данном случае структурную компактность можно охарактеризовать диаметром и радиусом структуры [8–9]:

$$d = \max_{\vartheta \in V} \in \vartheta, \quad (1)$$

где  $\max \in (\vartheta)$  — наибольшее расстояние между всеми парами вершин графа.

$$r = \min_{\vartheta \in V} \in \vartheta, \quad (2)$$

где  $\min \in (\vartheta)$  — наименьшее расстояние между всеми парами вершин графа.

Алгоритм Дейкстры обладает свойством локальной оптимальности: в процессе работы алгоритма дерево кратчайших путей разрастается, но не перестраивается, что позволяет эффективно использовать алгоритм Дейкстры для случая поиска пути из исходного узла  $p_1$  в целевой узел  $p_3$  или в множество целевых узлов [10–14]. На рис. 3 показана графическая реализация алгоритма Дейкстры на абстрактном графе.

В результате работы алгоритма Дейкстры формируется матрица расстояний  $D(G)$ .

$$D(G) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 2 & 4 & 3 & 4 & 4 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 3 & 2 & 3 & 3 \\ - & - & 0 & 1 & 2 & 1 & 2 & 2 \\ - & - & - & 0 & 2 & 1 & 2 & 2 \\ - & - & - & - & 0 & 1 & 2 & 2 \\ - & - & - & - & 1 & 0 & 1 & 1 \\ - & - & - & - & 1 & 2 & 0 & 3 \\ - & - & - & - & 2 & 3 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Заметим, что матрица расстояний  $D(G)$  симметрична относительно главной диагонали. С помощью полученной матрицы для каждой вершины графа  $G$  определим наибольшее расстояние между всеми парами вершин графа — диаметр графа и наименьшее расстояние — радиус графа. На рис. 4 показан диаметр и радиус графа с указанием периферийной и центральной вершин.

Из выше изложенного видно, что полная оценка информационной системы требует учитывать показатели деятельности по передаче информационных ресурсов потре-

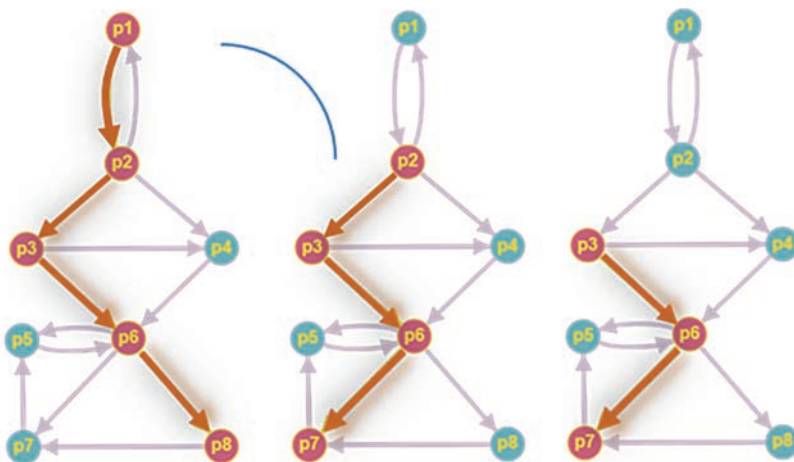


Рис. 3. Кратчайшие пути между вершинами графа

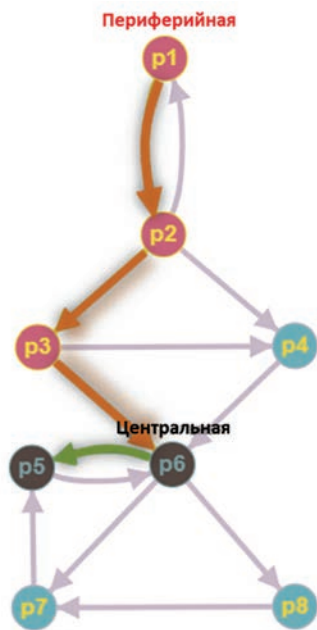


Рис. 4. Кратчайшие пути между вершинами графа

бителям информации, а также самые различные свойства программно-аппаратных комплексов. Однако, по указанным показателям затруднительно определить обобщенный показатель эффективности.

Здесь нужно, разделять возникающие в процессе приобретения знаний от расчётно-типовых организационных единиц (РТОЕ) эффекты по видам, рассматривая: во-первых, научно-технические эффекты, связанные с глубиной научной проработки решаемых проблем, развитием уровня информационных технологий; во-вторых, экономические эффекты, определяемые интенсификацией рабочих процессов ДЛ ОВУ РВиА, повышением производительности, оптимизация организационных структур ОВУ РВиА.

В таких случаях, как правило, важную роль играют экономические показатели. Анализ методов оценки эффективности информационного обслуживания В.К. Даугелы и Ю.А. Зыкова [15] выделено два основных подхода, используемых в методиках экономической эффективности от мероприятий по информационному обеспечению: во-первых, непосредственное оценивание эффективности, когда сопоставляются эффект, полученный от использования информационных ресурсов, с затратами на организацию информационного обеспечения; во-вторых, определение доли от использования информационных ресурсов в общем эффекте, полученном в системе, где осуществлялось информационно обслуживание.

С учетом предложенных общих методических подходов оценку НТУ предлагается осуществлять с использованием метода, основанного на получении численных

значений показателей эффективности, характеризующих НТУ ПАК подсистем (объектов), входящих в состав ИС, и показателей их взаимодействия при управлении РВиА.

При этом для определения показателей НТУ применяются методы, основанные на определении значений совокупности обобщенных и единичных показателей качества, характеризующих отдельные свойства оцениваемой системы, на их сравнении с ПК базовой системы или установленными требованиями и вычислении интегральной оценки качества ИС РВиА.

### Заключение

Вопросы выбора и обоснования показателей информационной системы для поддержки принятия решений управлением ракетных войск и артиллерии в операциях вообще являются определяющими в задачах эффективности функционирования ИС.

Выбор показателей оценки ИС связан с всесторонним и тщательным рассмотрением физической природы рассматриваемого свойства системы. В связи с этим, выбор показателей оценки эффективности производится при построении конкретных моделей функционирования системы.

Предложенный математический аппарат теории графов позволяет оценить количественные характеристики информационных потоков и связей ИС РВиА. На основе анализа информационных потоков и связей между ДЛ ОУ РВиА в заданный интервал времени, становится возможным проводить глубокий анализ структуры информационных потоков для повышения эффективности выполнения управленческих задач.

Концепция оптимизации ИС считает рациональными те варианты решения, которые обеспечивают максимизацию (минимизацию) показателя оценки эффективности информационной системы.

В ходе проведенного исследования были установлены четыре существенных фактора, в наибольшей степени влияющих на предназначение, структуру и состав критериев и показателей оптимизации. Таким образом, изложенный подход обоснованная системы показателей ИС РВиА позволяет дать совокупную, системную оценку подсистем и объектов ИС РВиА и перейти к решению вопросов технологии синтеза информационной системы РВиА.

### Литература

1. Носов М.И. Применение современных информационных технологий в автоматизированной системе управления материально-технического обеспечения // Сборник материалов конференции. М.: 3 ЦНИИ Минобороны России, 2015. С. 129–138.
2. Сафронов А.Д. Математическая модель формирования информационного процесса в типовом цикле управления должностных лиц органов управления материально-

техническим обеспечением // Сборник научных статей XX Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности» и симпозиума «Проблемы материально-технического обеспечения войск (сил) в современных условиях» (Санкт-Петербург, 3–6 апреля 2017). СПб.: ВА МТО, 2017. С. 612–617.

3. *Носов М.И., Карганов В.В.* Концептуальные подходы моделирования единого информационного пространств подсистем специального назначения // Военная мысль. 2019. № 1. С. 120–128.

4. *Карганов В.В., Носов М.И.* Классификация интегрированной системы поддержки принятия решений в управлении материально-техническим обеспечением // Материалы конференций ГНИИ «Нацразвитие» (Санкт-Петербург, 25–28 июня 2016 г.). СПб.: ГНИИ «Нацразвитие», 2016. С. 21–27.

5. *Носов М.И.* Концептуальные подходы по интеграции автоматизированной системы научно-технической экспертизы в существующие и разрабатываемые автоматизированные системы военного назначения // Сборник материалов конференции в рамках научно-деловой программы Международного военно-технического форума «АРМИЯ-2018» (Москва, 21–26 августа 2018 г.).

6. *Гвоздев А.Е., Ицук В.А., Морозов О.А.* Направления повышения оперативности оценки боевых возможностей войсковых формирований с использованием боевых потенциалов // Материалы научно-практической конференции «Состояние и приоритетные направления разработки и применения систем моделирования военных (боевых) действий» (Москва, 21 октября 2015 г.). М.: РАН, 2016. С. 138–147.

7. *Носов М.И.* Анализ применения информационных технологий в исследованиях МТО группировок войск (сил) // Сборник материалов XXV юбилейной Международной научно-практической конференции «Предупреждение. Спасение. Помощь» (Химки, 19 марта 2015 г.).

М.: Изд-во ВПО АГЗ МЧС России, 2015. URL: <http://konf.x-pdf.ru/19tehnicieskie/443150-1-itogoviy-sbornik-materialov-xxv-mezhdunarodnoy-nauchno-prakticheskoy-konferencii-preduprezhdenie-spasenie-pomosch-posvyasche.php> (дата обращения 29.08.2019).

8. *Тарасова В.В.* Применение динамической графовой модели для построения и анализа социальной сети образовательной организации // Тр. XVIII всерос. науч.-метод. конф. «Телематика» (Санкт-Петербург, 20–23 июня 2011 г.). СПб., 2011. Т. 1. Секция А. С. 192–194.

9. *Лебедев С.С., Новиков Ф.А.* Необходимое и достаточное условие применимости алгоритма Дейкстры // Компьютерные инструменты в образовании. 2017. № 4. С. 5–13.

10. *Тараканов К.В., Коровяк И.Д.* Эффективность научно-информационной деятельности. М.: МГИК, 1985. 65 с.

11. *Курнос Ю.В., Конотопов П.Ю.* Аналитика: методология, технология и организация информационно-аналитической работы. М.: Русаки, 2004. 550 с.

12. *Бушуева Л.И.* Методология статистического исследования информационного обеспечения маркетинговой деятельности: дис. ... докт. экон. наук. Оренбург, 2009. С. 266.

13. *Бушуева Л.И.* Методология исследования систем информационного обеспечения маркетинговой деятельности // Вестник Научно-исследовательского центра корпоративного права, управления и венчурного инвестирования Сыктывкарского государственного университета. 2010. № 2. URL: <http://koet.syktu.ru/vestnik/2010/2010-2/1/1.htm> (дата обращения 29.08.2019).

14. *Карминский А.М., Черников Б.В.* Методология создания информационных систем. 2-е изд. М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2012. 320 с.

15. *Даугела В.К., Зыков Ю.А.* Анализ методов определения эффективности информационного обслуживания // НТИ. Сер. 2. 1984. № 8. С. 1–9.



## METHODOLOGICAL BASES OF SUBSTANTIATION OF SYSTEM OF INDICATORS OF INFORMATION SYSTEM FOR DECISION SUPPORT BY MANAGEMENT OF ROCKET TROOPS AND ARTILLERY IN OPERATIONS

**MIKHAIL I. NOSOV,**

St. Petersburg, Russia, mikhail.nosov.64@mail.ru

**DENIS N. BORUNOV,**

St. Petersburg, Russia, denbor.07@mail.ru

**KEYWORDS:** integrated assessment; system of indicators; quantitative assessment; quality criteria of information systems; balanced scorecard.

### ABSTRACT

The solution of a complex scientific and technical task to assess the effectiveness of the information system of missile troops and artillery in operations should be based on uniform methodological principles and take into account the system of indicators that reflect the state, structure and development of the information system, including its individual components that ensure the functioning of the system of missile troops and artillery, its role in the decision-making process in operations. The proposed approaches to the formation of indicators of the information system to support decision-making management of missile troops and artillery in operations take into account the trends in the development of modern information technologies aimed at imparting intellectual properties of the created information systems. Modern requirements to the quantitative and qualitative characteristics of the control processes of missile troops and artillery in operations require a deep and comprehensive analysis of information flows and communications between officials of management bodies. Based on this, it is proposed to assess the quantitative and qualitative characteristics of information flows and communications between officials of management bodies in a given time interval, taking into account the specifics of the tasks through the apparatus of graph theory in order to improve the efficiency of the information system of missile troops and artillery. The complex criterion of system efficiency of information system for support of decision-making by management of rocket troops and artillery in operations is offered, allowing to give the cumulative, system estimation of subsystems and objects of information system of rocket troops and artillery which are at any stage of a life cycle. It is established that, taking into account the specifics of the creation and functioning of the information system of missile troops and artillery, a quantitative assessment and justification of a promising information system is required when solving quality management problems at all stages of its life cycle. Among such tasks are planning, forecasting and justification of the prospective information system of missile troops and artillery in the process of creation and further development, development of technical specifications for the creation and modernization of the information system of missile troops and artillery.

### REFERENCES

1. Nosov M.I. Primenenie sovremennyh informacionnyh tehnologij v avtomatizirovannoj sisteme upravleniya material'no-tehnicheskogo obespecheniya [Application of modern information technologies in the automated control system of material and technical support]. *Sbornik materialov konferencii* [Collection of conference materials]. Moscow: 3 Central research Institute of the Ministry of defence of Russia Publ., 2015. Pp. 129-138.
2. Safronov A.D. Matematicheskaya model' formirovaniya informacionnogo processa v tipovom cikle upravleniya dolzhnostnyh lic organov upravleniya material'no-tehnicheskim obespecheniem [Mathematical model of formation of information process in a typical cycle of management of officials of management bodies of material and technical support]. *Sbornik nauchnyh statej XX Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Aktual'nye problemy zaschity i bezopasnosti" i simpoziuma "Problemy material'no-tehnicheskogo obespecheniya vojsk (sil) v sovremennyh usloviyah"* [Proc. of the XX All-Russia scientific and practical conference "Actual problems of protection and safety" and a symposium "Problems of material support of armies (forces) in modern conditions", St. Petersburg, April 3-6, 2017]. St. Petersburg, 2017. Pp. 612-617.
3. Nosov M.I., Karganov V.V. Conceptual approaches to modeling the unified information space of special purpose subsystems. *Military thought*. 2019. No. 1. C. 120-128.
4. The Karganov, V. V., Nosov M.I. [Classification of integrated decision support system in logistics management]. *Materialy konferencij GNII "Nacrazvitie"* [Proceedings of the conference GSDI "Natdevelopment", St. Petersburg, June 25-28, 2016]. St. Petersburg: GSDI "Natdevelopment", 2016. Pp. 21-27.
5. Nosov M.I. Konceptual'nye podhody po integracii avtomatizirovannoj sistemy nauchno-tehnicheskoy `ekspertizy v suschestvuyuschie i razrabatyvaemye avtomatizirovannye sistemy voennogo naznacheniya [Conceptual approaches to the integration of the automated system of scientific and technical expertise in existing and developing automated systems for military purposes]. *Sbornik materialov konferencii v ramkah nauchno-delovoj programmy Mezhdunarodnogo voenno-tehnicheskogo foruma "ARMIYA-2018"* [Materials





the Collection of materials of conference within the scientific and business program of the International military and technical forum "ARMY-2018", Moscow, August 21-26, 2018]. Moscow, 2018.

6. Gvozdev A.E., Ishchuk V.A., Morozov O.A. Napravleniya povysheniya operativnosti ocenki boevykh vozmozhnostej vojskovykh formirovanij s ispol'zovaniem boevykh potencialov [The directions of increase of efficiency of an assessment of fighting possibilities of army formations with use of fighting potentials]. *Materialy nauchno-prakticheskoy konferencii "Sostoyanie i prioritetye napravleniya razrabotki i primeneniya sistem modelirovaniya voennykh (boevykh) dejstvij"* [Proc. of scientific and practical conference "A condition and the priority directions of development and application of systems of modeling of military (fighting) actions", Moscow, October 21, 2015]. Moscow, 2016. Pp. 138-147.

7. Nosov M.I. Analiz primeneniya informacionnykh tehnologij v issledovaniyah MTO gruppировок vojsk (sil) [Analysis of the use of information technology in research logistics groups of troops (forces)]. *Cbornik materialov XXV yubilejnoj Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Preduprezhdenie. Spasenie. Pomosch'"* [Proceedings of the XXV anniversary International scientific and practical conference "Warning. Salvation. Assistance ", Khimki, March 19, 2015]. Moscow, 2015. URL: <http://konf.x-pdf.ru/19tehnicheskie/443150-1-itogoviy-sbornik-materialov-xxv-mezhdunarodnoj-nauchno-prakticheskoy-konferencii-preduprezhdenie-spasenie-pomosch-posvyasche.php> (date of access 29.08.2019).

8. Tarasova V.V. Primenenie dinamicheskoy grafovoj modeli dlya postroeniya i analiza social'noj seti obrazovatel'noj organizacii [Application of dynamic grafovy model for construction and the analysis of a social network of the educational organization]. *Trudy XVIII vserossijskoj nauchno-metodicheskoy konferencii "Telematika"* [Proc. of XVIII of the All-Russia scientific and methodical conference "Telematics", St. Petersburg, June 20-23, 2011]. St. Petersburg, 2011. Vol. 1. Section A. Pp. 192-194.

9. Lebedev S.S., Novikov F.A. The Necessary and Sufficient Condition for Dijkstra's Algorithm Applicability. *Computer tools in educa-*

*tion*. 2017. No. 4. Pp. 5-13.

10. Tarakanov K.V., Korovyakova I.D. *'Effektivnost' nauchno-informacionnoj deyatel'nosti* [Efficiency of scientific and information activity]. Moscow: MGIK, 1985. 65 p.

11. Kurnosov Yu. V., Konotopov P. Yu. *Analitika: metodologiya, tehnologiya i organizaciya informacionno-analiticheskoy raboty* [Analytics: methodology, technology and organization of information and analytical work]. Moscow: Rusaki, 2004. 550 p.

12. Bushueva L.I. *Metodologiya statisticheskogo issledovaniya informacionnogo obespecheniya marketingovoj deyatel'nosti* [Methodology of statistical research of information support of marketing activity. Dr. economic sci. diss.] Orenburg, 2009. Pp. 266.

13. Bushueva L.I. *Metodologiya issledovaniya sistem informacionnogo obespecheniya marketingovoj deyatel'nosti* [Methodology of research of systems of information support of marketing activity]. *Corporate Governance and Innovative Development of the Economy of the North: Bulletin of the Research Center for Corporate Law, Governance and Venture Investments of Syktyvkar State University*. 2010. № 2. URL: <http://koet.syktsu.ru/vestnik/2010/2010-2/1/1.htm> (date of access 29.08.2019).

14. Karminsky A.M., Chernikov B.V. *Metodologiya sozdaniya informacionnykh sistem* [Methodology of creation of information systems: a tutorial]. 2nd ed. Moscow: Forum: INFRA-M, 2012. 320 p.

15. Daugela V.K., Zykov Yu.A. *Analiz metodov opredeleniya `effektivnosti informacionnogo obsluzhivaniya* [Analysis of methods for determining the effectiveness of information services]. *Nauchno-tehnicheskaya informaciya. Seriya 2. Informacionnye processy i sistemy* [Scientific and technical information. Series 2. Information processes and systems]. 1984. No. 8. Pp. 1-9.

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Nosov M.I., PhD, Associate Professor, Senior Researcher of the Mikhailovskaya Military Artillery Academy;

Borunov D.N., PhD, Head of Research Department of the Mikhailovskaya military artillery Academy.

---

**For citation:** Nosov M.I., Borunov D.N. Methodological bases of substantiation of system of indicators of information system for decision support by management of rocket troops and artillery in operations. *H&ES Research*. 2019. Vol. 11. No. 6. Pp. 74-84. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10297 (In Russian)