

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.

ПЛАТА С АСПИРАНТОВ ЗА ПУБЛИКАЦИЮ РУКОПИСИ НЕ ВЗИМАЕТСЯ

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

С требованиями можно ознакомиться на сайте: www.H-ES.ru.

Все номера журнала находятся в свободном доступе на сайте.

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

© ООО «ИД Медиа Паблшер», 2019

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.

POSTGRADUATE STUDENTS FOR PUBLICATION OF THE MANUSCRIPT WILL NOT BE CHARGED

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.

The requirements are available on the website: 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.

© "Media Publisher", LLC 2019



Учредитель:

ООО «ИД Медиа Паблшер»

Издатель:

СВЕТЛАНА ДЫМКОВА

Главный редактор:

КОНСТАНТИН ЛЕГКОВ

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;
КИРГАНЕВ А.В., д.т.н., доцент;
КУРНОСОВ В.И., д.т.н., профессор,
 академик Международной академии
 информатизации, Действительный член
 Российской академии естественных наук;
МАНУЙЛОВ Ю.С., д.т.н., профессор;
МОРОЗОВ А.В., д.т.н., профессор,
 Действительный член Академии
 военных наук РФ;
МОШАК Н.Н., д.т.н., доцент;
ПРОРОК В.Я., д.т.н., профессор;
СЕМЕНОВ С.С., д.т.н., доцент;
СНИЦЫН Е.А., д.т.н., профессор;
ШАТРАКОВ Ю.Г., д.т.н., профессор,
 заслуженный деятель науки РФ.

H&ES Research зарегистрирован
 Федеральной службой по надзору
 за соблюдением законодательства в
 сфере массовых коммуникаций и охране
 культурного наследия.
 Издательская лицензия
 ПИ № ФС 77-60899.

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.

Дизайн и компьютерная верстка:

ОКСАНА ИВАНОВА

СОДЕРЖАНИЕ

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Борисов Н.И.

Построение макро модели эквивалентной электрической схемы,
 сохраняющей простую зависимость от варьируемых параметров
 электрофизической модели 4

Абдурахимов А.А., Левандович А.В., Мосин Д.А., Северенко А.В.

Методика обоснования параметров орбиты и характеристик
 двигательной установки малого космического аппарата
 дистанционного зондирования земли 12

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

Павликов С.Н., Убанкин Е.И.

Математические основы построения нового класса
 широкополосных сигналов для систем связи
 с разделением каналов по форме 24

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Буренин А.Н., Легков К.Е.

Модели состояния современных инфокоммуникационных сетей
 при организации стохастического управления ими 32

Вержаковская М.А., Аронов В.Ю., Слепнев А.А.

Разработка постпроцессора для оптимизации работы на станках
 с числовым программным управлением 40

Воробьев Е.Г.

Математические модели управления системой обеспечения доступности
 информации и оценки качества ее функционирования 51

Говоритель В.В.

Проблема обеспечения качества автоматизированных систем
 военного назначения и пути её решения 64

Коцыняк М.А., Лаута О.С., Иванов Д.А.

Математическая модель таргетированной компьютерной атаки 73

Куракин А.С., Костырева А.А.

Модель разграничения прав доступа для информационной системы
 специального назначения 82

Шелухин О.И., Барков В.В., Полковников М.В.

Сравнительный анализ алгоритмов оценки количества и структуры атрибутов
 в задачах классификации мобильных приложений 90



CONTENTS

AVIATION, SPACE-ROCKET HARDWARE

Borisov N.I.

Building a macromodel of equivalent electrical circuit that retains a simple dependence on variable parameters of the electrophysical model 4

Abdurahimov A.A., Levandovich A.V., Mosin D.A., Severenko A.V.

Technique for substantiating the parameters of orbit and characteristics of the motor installation of a small space apparatus for remote sensing of the earth 12

RF TECHNOLOGY AND COMMUNICATION

Pavlikov S.N., Ubankin E.I.

Mathematical basics of building a new class of broadband signals for communication systems with split channels form 24

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Burenin A.N., Legkov K.E.

Status models of modern infocommunication networks at the organization of stochastic management of them 32

Vorzhakovskaya M.A., Aronov V.Yu., Slepnev A.A.

Post processor development for optimize work of machines with numerical program control 40

Vorobiev E.G.

Mathematical models of ensuring information availability management system and quality assessment of its functioning 51

Govoritel V.V.

The problem of quality assurance of automated military assignment systems and their solutions 64

Kotsynyak M.A., Lauts O.S., Ivanov D.A.

Mathematical model of targeted computer attack 73

Kurakin A.S., Kostyreva A.A.

Model of limitation of rights of access for special purpose information system 82

Sheluhin O.I., Barkov V.V., Polkovnikov M.V.

Comparative analysis of the algorithms for assessing the quantity and structure of attributes in the problems of classification of mobile applications 90

Founder:

"Media Publisher", LLC

Publisher:

SVETLANA DYMKOVA

Editor in chief:

KONSTANTIN LEGKOV

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;
MANUILOV Y.S., PhD, Full Professor;
MOROZOV A.V., PhD, Full Professor, Actual Member of the Academy of Military Sciences;
MOSHAK N.N., PhD, Docent;
PROROK V.Y., PhD, Full Professor;
SEME NOV 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. Publishing license ПИ № ФС 77-60899.

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.

Design and computer imposition:

OKSANA IVANOVA



doi: 10.24411/2409-5419-2018-10254

ПОСТРОЕНИЕ МАКРОМОДЕЛИ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ, СОХРАНЯЮЩЕЙ ПРОСТУЮ ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ВАРЬИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

БОРИСОВ

Николай Иванович

АННОТАЦИЯ

На сегодняшний день одной из важных проблем в области эксплуатации космических аппаратов является возникновение электростатических разрядов, являющихся причиной выхода из строя бортовой радиоэлектронной аппаратуры. Такие электростатические разряды обусловлены электризацией поверхности космических аппаратов в результате длительного воздействия ионизирующего космического излучения. Теоретическому и практическому исследованию указанной проблемы посвящено множество работ отечественных и зарубежных авторов. Для обеспечения надёжной работы бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов в условиях периодического возникновения электростатических разрядов требуется в первую очередь знание величин возникающих помеховых сигналов во фрагментах бортовой кабельной сети, проложенных по внешней поверхности космических аппаратов. Это требует проведения машинного моделирования картины растекания токов по поверхности космических аппаратов на основании результатов которого формируются требования к помехозащищённости электронных блоков, включаемых в космические аппараты. В качестве математической модели, используемой для исследования процесса растекания токов, часто берётся линейная эквивалентная электрическая схема, состоящая из значительного (10^5 и более) количества узлов и равномерно покрывающая поверхность космических аппаратов в виде сетки. Задачи анализа таких схем обладают высокой трудоёмкостью и могут требовать для их решения десятки часов машинного времени, что сильно затрудняет проведение множества испытаний для различных параметров электростатических разрядов и, как следствие, увеличивает сроки выработки необходимых требований к бортовой радиоэлектронной аппаратуре. Предлагается формальный метод построения макромодели линейной эквивалентной электрической схемы, сформированной по антенне спутника связи. Макромодель может содержать столько фазовых переменных, сколько желает проектировщик антенны. Макромодель сохраняет простую зависимость ее выходных характеристик от конструктивно-технологических варьируемых параметров модели антенны. Применение данного подхода позволяет на несколько порядков сократить трудоёмкость вычислений.

Сведения об авторе:

д.т.н., профессор, профессор
Национального исследовательского
университета «Высшая школа экономики»,
г. Москва, Россия, nborisov@hse.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: макромодель; эквивалентная электрическая схема; антенна спутника связи; космические аппараты; электростатический разряд.

Для цитирования: Борисов Н.И. Построение макромодели эквивалентной электрической схемы, сохраняющей простую зависимость от варьируемых параметров электрофизической модели // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 2. С. 4-11. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10254

Макромоделирование

Важной особенностью задачи анализа растекания токов по поверхности космических аппаратов (КА) в результате электростатических разрядов (ЭСР) является необходимость вычисления токов не на всей поверхности КА, а лишь в небольшом фрагменте, расположенном вблизи бортовой кабельной сети (БКС). Это означает, что из сотен тысяч узлов для анализа выделяются, в зависимости от разрешения сетки, порядка 400 узлов. Указанная особенность позволяет получить существенную выгоду, а именно на несколько порядков сократить время анализа модели. Так, в работе [7] разработан метод, позволяющий исключить из процесса вычислений токи в ветвях схемы, не входящих в интересующий фрагмент поверхности. Метод основан на одновременном использовании явного и неявного метода Эйлера для построения новой вычислительной схемы.

Наличие небольшого количества интересующих характеристик схемы открывает возможности для использования методов редукции моделей и, в частности, методов макромоделирования. Суть этих методов состоит в построении и анализе макромоделей, формируемых в результате исключения из исходных моделей внутренних фазовых переменных. Такое преобразование позволяет существенно сократить размерность моделируемой системы и, как следствие, временные затраты на моделирование [6].

Один из эффективных подходов к макромоделированию линейных эквивалентных электрических схем исследован в работах [8–9]. Он основан на формальном исключении из модели внутренних фазовых переменных посредством обращения в аналитическом виде полиномиальных матриц с сохранением аналитической зависимости от параметров. Построенные макромоделей позволяют на несколько порядков быстрее вычислять динамические, частотные и другие характеристики модели, не снижая точности результатов. В связи с этим применение указанного подхода к задаче анализа растекания токов по поверхности КА является оправданным.

1. Постановка задачи

Исходная модель сформирована по линейной эквивалентной электрической схеме, имеющей специальную структуру, и выглядит следующим образом

$$\begin{bmatrix} C_{11} & 0 & 0 \\ 0 & L_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\bar{X}}_1(t) \\ \dot{\bar{X}}_2(t) \\ \dot{\bar{X}}_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} \\ G_{21} & 0 & G_{23} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{X}_1(t) \\ \bar{X}_2(t) \\ \bar{X}_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_1(t) \\ \bar{0} \\ \bar{0} \end{bmatrix}, \quad (1.1)$$

$$\bar{X}(0) = \bar{X}_0,$$

где $C_{11} = cE_{11}$, $L_{22} = lE_{22}$, $G_{11} = r^{-1}H_{11}$, $G_{13} = r^{-1}H_{13}$, $G_{31} = r^{-1}H_{31}$, $G_{33} = r^{-1}H_{33}$,

H_{11} , H_{13} , H_{31} , H_{33} — числовые матрицы, причем H_{33} — диагональная матрица,

C_{12} , C_{21} , C_{23} , C_{32} — числовые матрицы, вектор $\bar{Y}_1(t)$ имеет единственный ненулевой коэффициент,

r , l , c — варьируемые параметры модели (буквы), которые могут принимать различные числовые значения;

Цель дальнейших преобразований заключается в получении такой новой вычислительной схемы решения задачи (1), которая:

- содержит в себе только заданные пользователем коэффициенты вектора $\bar{X}(t)$;
- сохраняет простую зависимость как от шага интегрирования h системы дифференциальных уравнений, так и от варьируемых параметров r , l , c .

2. Первый этап редукции

Из 3-й строки системы (1.1) следует, что

$$\bar{X}_3(t) = -G_{33}^{-1}(G_{31}\bar{X}_1(t) + G_{32}\bar{X}_2(t)). \quad (2.1)$$

Это вектор напряжений в узлах, к которым не подключаются конденсаторы. Подставив его в первые две

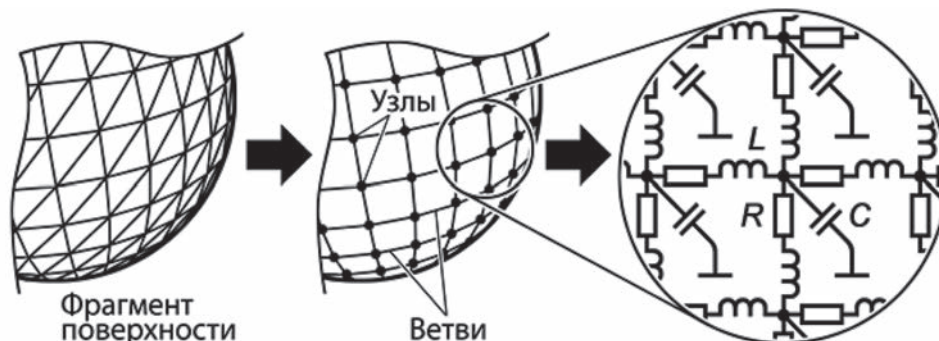


Рис. 1. Фрагмент поверхности КА и соответствующая ЛЭЭС

подсистемы системы (1.1) получим задачу меньшего размера в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\begin{bmatrix} C_{11} & 0 \\ 0 & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\bar{X}}_1(t) \\ \dot{\bar{X}}_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_{11} - G_{13}G_{33}^{-1}G_{31} & G_{12} - G_{13}G_{33}^{-1}G_{32} \\ G_{21} - G_{23}G_{33}^{-1}G_{31} & -G_{23}G_{33}^{-1}G_{32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{X}_1(t) \\ \bar{X}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_1(t) \\ \bar{0} \end{bmatrix}. \quad (2.2)$$

Умножив систему (2.2) на диагональную матрицу, обратную к матрице при векторе производных, получим систему дифференциальных уравнений в явной форме

$$\dot{\bar{X}}(t) + A\bar{X}(t) = c\bar{Y}(t), \quad \bar{X}(0) = \bar{X}_0, \quad (2.3)$$

Или в блочной форме

$$\begin{bmatrix} \dot{\bar{X}}_1(t) \\ \dot{\bar{X}}_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{X}_1(t) \\ \bar{X}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c^{-1}\bar{Y}_1(t) \\ \bar{0} \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

где $A_{11} = c^{-1}[r^{-1}H_{11} - r^{-1}H_{13}H_{33}^{-1}rr^{-1}H_{31}] = (cr)^{-1}[H_{11} - H_{13}H_{33}^{-1}H_{31}] = (cr)^{-1}F_{11};$

$$A_{12} = c^{-1}[G_{12} - r^{-1}H_{13}H_{33}^{-1}rG_{32}] = c^{-1}[G_{12} - H_{13}H_{33}^{-1}G_{32}] = c^{-1}F_{12};$$

$$A_{21} = l^{-1}[G_{21} - G_{23}H_{33}^{-1}rr^{-1}H_{31}] = l^{-1}[G_{21} - G_{23}H_{33}^{-1}H_{31}] = l^{-1}F_{21};$$

$$A_{22} = l^{-1}[-G_{23}H_{33}^{-1}rG_{32}] = l^{-1}r[-G_{23}H_{33}^{-1}G_{32}] = l^{-1}rF_{22};$$

$F_{11}, F_{12}, F_{21}, F_{22}$ — числовые матрицы.

3. Второй этап редукции

На втором этапе редукции можно исключить из системы (2.4) как подвектор $\bar{X}_1(t)$ (напряжения в узлах, к которым подсоединяются конденсаторы) так и подвектор $\bar{X}_2(t)$ (токи, протекающие через индуктивные элементы).

Исключим из решаемой задачи подвектор $\bar{X}_2(t)$. Для этого запишем систему (2.4) в блочном виде вычислительных схем явного и неявного методов Эйлера.

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ \bar{U}_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} E_{11} - hA_{11} & -hA_{12} \\ -hA_{21} & E_{22} - hA_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \end{bmatrix} = h \begin{bmatrix} \bar{Z}_1 \\ \bar{0} \end{bmatrix}, \quad (3.1)$$

$$\begin{bmatrix} E_{11} + hA_{11} & hA_{12} \\ hA_{21} & E_{22} + hA_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ \bar{U}_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \end{bmatrix} = h \begin{bmatrix} \bar{R}_1 \\ \bar{0} \end{bmatrix}, \quad (3.2)$$

где $\bar{Z}_1 = c^{-1}\bar{Y}_{1(i-1)}, \bar{R}_1 = c^{-1}\bar{Y}_{1(i)}$;

$$\bar{U}_1 = \bar{X}_1(t_i), \bar{U}_2 = \bar{X}_2(t_i);$$

$$\bar{V}_1 = \bar{X}_1(t_{i-1}),$$

h — шаг численного интегрирования.

Системы (3.1) и (3.2) эквивалентны системе из четырех систем уравнений

$$\bar{U}_1 - (E_{11} - hA_{11})\bar{V}_1 + hA_{12}\bar{V}_2 = h\bar{Z}_1, \quad (3.3)$$

$$\bar{U}_2 + hA_{21}\bar{V}_1 - (E_{22} - hA_{22})\bar{V}_2 = \bar{0}, \quad (3.4)$$

$$(E_{11} + hA_{11})\bar{U}_1 + hA_{12}\bar{U}_2 - \bar{V}_1 = h\bar{R}_1, \quad (3.5)$$

$$hA_{21}\bar{U}_1 + (E_{22} + hA_{22})\bar{U}_2 - \bar{V}_2 = \bar{0}, \quad (3.6)$$

Решая систему (3.3) — (3.6) в аналитическом виде можно получить две формулы (явную и неявную) для вычисления вектора \bar{U}_1 .

3.1. Получение явной формулы

1) Из (3.4) следует, что

$$\bar{U}_2 = -hA_{21}\bar{V}_1 + (E_{22} - hA_{22})\bar{V}_2. \quad (3.1.1)$$

2) Подставим (3.1.1) в (3.6) и вычислим подвектор \bar{V}_1 .

$$hA_{21}\bar{U}_1 + (E_{22} + hA_{22})[-hA_{21}\bar{V}_1 + (E_{22} - hA_{22})\bar{V}_2] - \bar{V}_2 = \bar{0},$$

или

$$\bar{V}_2 = h^{-2}(A_{22}^2)^{-1}[hA_{21}\bar{U}_1 - h(E_{22} + hA_{22})A_{21}\bar{V}_1]. \quad (3.1.2)$$

3) Подставим (3.1.1) и (3.1.2) в (3.3).

$$\bar{U}_1 - (E_{11} - hA_{11})\bar{V}_1 + hA_{12}\bar{V}_2 = h\bar{Z}_1,$$

или

$$P\bar{U}_1 - (P + hQ)\bar{V}_1 = h\bar{Z}_1, \quad (3.1.3)$$

где $P = A_{12}(A_{22}^2)^{-1}A_{21} + E_{11}, Q = A_{12}A_{22}^{-1}A_{21} - A_{11}$.

3.2. Получение неявной формулы

Подставим (3.1.1) и (3.1.2) в (3.5).

$$(E_{11} + hA_{11})\bar{U}_1 + hA_{12}\bar{U}_2 - \bar{V}_1 = h\bar{R}_1,$$

или

$$(E_{11} + hA_{11})\bar{U}_1 - (h^2 A_{12} A_{21} + E_{11})\bar{V}_1 + hA_{12}(E_{22} - hA_{22})\bar{V}_2 = h\bar{R}_1.$$

Подставим в последнее выражение ранее полученное выражение (3.1.2).

$$(E_{11} + hA_{11})\bar{U}_1 - (h^2 A_{12} A_{21} + E_{11})\bar{V}_1 + hA_{12}(E_{22} - hA_{22})h^{-2}(A_{22}^2)^{-1}[hA_{21}\bar{U}_1 - h(E_{22} + hA_{22})A_{21}\bar{V}_1] = h\bar{R}_1,$$

или

$$\{[E_{11} + A_{12}(A_{22}^2)^{-1}A_{21}] + h[A_{11} - A_{12}A_{22}^{-1}A_{21}]\}\bar{U}_1 - [h^2 A_{12} A_{21} - h^2 A_{12} A_{21} + E_{11} + A_{12}(A_{22}^2)^{-1}A_{21}]\bar{V}_1 = h\bar{R}_1.$$

При использовавшейся ранее замене переменных окончательное выражение имеет вид

$$(P - hQ)\bar{U}_1 - P\bar{V}_1 = h\bar{R}_1. \quad (3.1.4)$$

4. Третий этап редукции

После второго этапа редукции получили рабочие формулы (3.1.3) или (3.1.4), по которым можно вычислять только подвектор $\bar{X}_1(t)$ задачи (1.1). Отметим, что формулы (3.1.3), (3.1.4) сохраняют простую зависимость результатов вычислений от варьируемых параметров r, l, c исходной модели.

Для дальнейшего сокращения размера решаемой задачи проверим, возможно ли быстрое вычисление матриц P_1^{-1} и Q_2^{-1} из выражений (3.1.3), (3.1.4).

$$1) \quad P = E_{11} + A_{12}(A_{22}^2)^{-1}A_{21} = E_{22} + c^{-1}F_{12}(F_{22}^2)^{-1}(lr^{-1})^2 l^{-1}F_{21} = E_{11} + \frac{l}{cr^2}F_{12}(F_{22}^2)^{-1}F_{21}. \quad (4.1)$$

Из (4.1) видим, что для обращения в аналитическом виде матрицы P с сохранением аналитической зависимости от r, l, c требуется вычисление ее собственных значений и специальным образом нормированных правых и левых собственных векторов, что потребует огромного объема вычислений.

$$2) \quad Q = A_{12}A_{22}^{-1}A_{21} - A_{11} = c^{-1}F_{21}lr^{-1}F_{22}^{-1}l^{-1}A_{21} - (rc)^{-1}F_{11} = \frac{1}{cr}[F_{21}F_{22}^{-1}F_{12} - F_{11}]. \quad (4.2)$$

Из (4.2) видим, что обращение матрицы Q с сохранением аналитической зависимости от r, l, c сводится к обращению числовой матрицы с относительно небольшими вычислительными затратами.

Для проведения 3-го этапа редукции запишем выражения (3.1.3), (3.1.4) в блочном виде

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{U}_1 \\ \hat{U}_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V}_1 \\ \hat{V}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{0} \\ \hat{Z}_2 \end{bmatrix}, \quad (4.3)$$

$$\begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{U}_1 \\ \hat{U}_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V}_1 \\ \hat{V}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{0} \\ \hat{R}_2 \end{bmatrix}, \quad (4.4)$$

при обозначениях $S = P + hQ$, $T = P - hQ$, $\bar{U}_1 = \begin{bmatrix} \hat{U}_1 \\ \hat{U}_2 \end{bmatrix}$, $\bar{V}_1 = \begin{bmatrix} \hat{V}_1 \\ \hat{V}_2 \end{bmatrix}$, $\hat{Z} = h\bar{Z}_1$, $\hat{R} = h\bar{R}_1$.

Разбиение на блоки выражений (3.1.3), (3.1.4) должно проводиться так, чтобы подвекторы \hat{U}_2 и \hat{V}_2 состояли только из напряжений, к которым подсоединены конденсаторы и которые заданы пользователем. Кроме того, поскольку в схеме имеется единственный источник входных сигналов, он должен содержаться в подвекторах \hat{Z}_2 и \hat{R}_2 .

Системы (4.3), (4.4) эквивалентны системе из четырех подсистем уравнений

$$P_{11}\hat{U}_1 + P_{12}\hat{U}_2 - S_{11}\hat{V}_1 - S_{12}\hat{V}_2 = \hat{0}, \quad (4.5)$$

$$P_{21}\hat{U}_1 + P_{22}\hat{U}_2 - S_{21}\hat{V}_1 - S_{22}\hat{V}_2 = \hat{Z}_2, \quad (4.6)$$

$$T_{11}\hat{U}_1 + T_{12}\hat{U}_2 - P_{11}\hat{V}_1 - P_{12}\hat{V}_2 = \hat{0}, \quad (4.7)$$

$$T_{21}\hat{U}_1 + T_{22}\hat{U}_2 - P_{21}\hat{V}_1 - P_{22}\hat{V}_2 = \hat{R}_2, \quad (4.8)$$

1) Выделим их подсистемы (4.5) подвектор \hat{U}_1 .

$$\hat{U}_1 = P_{11}^{-1}[-P_{12}\hat{U}_2 + S_{11}\hat{V}_1 + S_{12}\hat{V}_2]. \quad (4.9)$$

2) Подставим \hat{U}_1 в подсистему (4.7) и выделим из полученного выражения подвектор \hat{V}_1

$$T_{11}P_{11}^{-1}[-P_{12}\hat{U}_2 + S_{11}\hat{V}_1 + S_{12}\hat{V}_2] + T_{12}\hat{U}_2 - P_{11}\hat{V}_1 - P_{12}\hat{V}_2 = \hat{0},$$

или

$$[T_{11}P_{11}^{-1}S_{11} - P_{11}]\hat{V}_1 + [T_{11}P_{11}^{-1}S_{12} - P_{12}]\hat{V}_2 + [-T_{11}P_{11}^{-1}P_{12} + T_{12}]\hat{U}_2 = \hat{0}.$$

Вычислим матрицу при векторе \hat{V}_1 .

$$[(P_{11} - hQ_{11})P_{11}^{-1}(P_{11} + hQ_{11}) - P_{11}]\hat{V}_1 = -h^2Q_{11}P_{11}^{-1}Q_{11}\hat{V}_1.$$

Отметим, что $[-h^2Q_{11}P_{11}^{-1}Q_{11}]^{-1} = -h^{-2}Q_{11}^{-1}P_{11}Q_{11}^{-1}$.

Таким образом

$$\widehat{V}_1 = -[T_{11}P_{11}^{-1}S_{11} - P_{11}]^{-1}[T_{11}P_{11}^{-1}S_{12} - P_{12}]\widehat{V}_2 - [T_{11}P_{11}^{-1}S_{11} - P_{11}]^{-1}[-T_{11}P_{11}^{-1}P_{12} + T_{12}]\widehat{U}_2,$$

или

$$\widehat{V}_1 = h^{-2}B_{11}^{-1}A_{11}B_{11}^{-1}[(A_{11} - hB_{11})A_{11}^{-1}(A_{12} + hB_{12}) - A_{12}]\widehat{V}_2 + h^{-2}B_{11}^{-1}A_{11}B_{11}^{-1}[-(A_{11} - hB_{11})A_{11}^{-1}A_{12} + (A_{12} - hB_{12})]\widehat{U}_2 \quad (4.10)$$

Решая систему (4.5)–(4.8) в аналитическом виде можно, в свою очередь, получить явные и неявные формулы, содержащие в качестве неизвестных величин только подвекторы \widehat{U}_2 и \widehat{V}_2 .

Вариант 1. (получение явной формулы).

Для получения явной формулы подставим полученные подвекторы \widehat{U}_1 и \widehat{V}_1 в (4.6).

$$P_{21}\widehat{U}_1 + P_{22}\widehat{U}_2 - S_{21}\widehat{V}_1 - S_{22}\widehat{V}_2 = \widehat{Z}_2,$$

или

$$[-P_{21}P_{11}^{-1}P_{12} + P_{22}]\widehat{U}_2 + [P_{21}P_{11}^{-1}S_{11} - S_{21}]\widehat{V}_1 + [P_{21}P_{11}^{-1}S_{12} - S_{22}]\widehat{V}_2 = \widehat{Z}_2.$$

Подставим вектор \widehat{V}_1 .

$$\begin{aligned} & [-P_{21}P_{11}^{-1}P_{12} + P_{22}]\widehat{U}_2 + \\ & + [P_{21}P_{11}^{-1}S_{11} - S_{21}]\{-[T_{11}P_{11}^{-1}S_{11} - P_{11}]^{-1}[T_{11}P_{11}^{-1}S_{12} - P_{12}]\}\widehat{V}_2 + \\ & + [P_{21}P_{11}^{-1}S_{11} - S_{21}]\{-[T_{11}P_{11}^{-1}S_{11} - P_{11}]^{-1}[-T_{11}P_{11}^{-1}P_{12} + T_{12}]\}\widehat{U}_2 + \\ & + [P_{21}P_{11}^{-1}S_{11} - S_{21}]\{[T_{11}P_{11}^{-1}S_{11} - P_{11}]^{-1}[\widehat{R}_1 - T_{11}P_{11}^{-1}\widehat{Z}_1]\} + \\ & + [P_{21}P_{11}^{-1}S_{12} - S_{22}]\widehat{V}_2 = \widehat{Z}_2, \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} & [(-P_{21}P_{11}^{-1}P_{12} + P_{22}) + (P_{21}P_{11}^{-1}S_{11} - S_{21}) \times \\ & \times [-(T_{11}P_{11}^{-1}S_{11} - P_{11})^{-1}](-T_{11}P_{11}^{-1}P_{12} + T_{12})]\widehat{U}_2 + \\ & + [(P_{21}P_{11}^{-1}S_{12} - S_{22}) + (P_{21}P_{11}^{-1}S_{11} - S_{21}) \times \\ & \times [-(T_{11}P_{11}^{-1}S_{11} - P_{11})^{-1}](T_{11}P_{11}^{-1}S_{12} - P_{12})]\widehat{V}_2 = \widehat{Z}_2. \end{aligned} \quad (4.11)$$

Получен 1-й вариант искомой вычислительной формулы. Запишем его с точностью до шага h , а затем с точностью до варьируемых параметров.

1) Вычисление $P_{21}P_{11}^{-1}S_{11} - S_{21}$.

$$\begin{aligned} P_{21}P_{11}^{-1}S_{11} - S_{21} &= P_{21}P_{11}^{-1}(P_{11} + hQ_{11}) - \\ &- P_{21} - hQ_{21} = P_{21}P_{11}^{-1}(P_{11} + hQ_{11}) - P_{21} - hQ_{21} = \\ &= P_{21} + hP_{21}P_{11}^{-1}Q_{11} - P_{21} - hQ_{21} = \\ &= h(P_{21}P_{11}^{-1}Q_{11} - Q_{21}). \end{aligned}$$

2) Вычисление $(P_{21}P_{11}^{-1}S_{11} - S_{21})[-(T_{11}P_{11}^{-1}S_{11} - P_{11})^{-1}]$.

$$\begin{aligned} & (P_{21}P_{11}^{-1}S_{11} - S_{21})[-(T_{11}P_{11}^{-1}S_{11} - P_{11})^{-1}] = \\ &= h^{-1}(P_{21}Q_{11}^{-1} - Q_{21}Q_{11}^{-1}P_{11}Q_{11}^{-1}). \end{aligned}$$

3) Вычисление

$$(P_{21}P_{11}^{-1}S_{11} - S_{21})[-(T_{11}P_{11}^{-1}S_{11} - P_{11})^{-1}][-(T_{11}P_{11}^{-1}P_{12} + T_{12})].$$

$$\begin{aligned} & (P_{21}P_{11}^{-1}S_{11} - S_{21})[-(T_{11}P_{11}^{-1}S_{11} - P_{11})^{-1}][-(T_{11}P_{11}^{-1}P_{12} + T_{12})] = \\ &= P_{21}P_{11}^{-1}P_{12} - P_{21}Q_{11}^{-1}Q_{12} - Q_{21}Q_{11}^{-1}P_{12} + Q_{21}Q_{11}^{-1}P_{11}Q_{11}^{-1}Q_{12}. \end{aligned}$$

4) Вычисление матрицы при векторе \widehat{U}_2

$$\begin{aligned} & -P_{21}P_{11}^{-1}P_{12} + P_{22} + P_{21}P_{11}^{-1}P_{12} - P_{21}Q_{11}^{-1}Q_{12} - \\ & - Q_{21}Q_{11}^{-1}P_{12} + Q_{21}Q_{11}^{-1}P_{11}Q_{11}^{-1}Q_{12} = \\ &= P_{22} - P_{21}Q_{11}^{-1}Q_{12} - Q_{21}Q_{11}^{-1}P_{12} + Q_{21}Q_{11}^{-1}P_{11}Q_{11}^{-1}Q_{12}. \end{aligned}$$

5) Вычисление

$$(P_{21}P_{11}^{-1}S_{11} - S_{21})[-(T_{11}P_{11}^{-1}S_{11} - P_{11})^{-1}](T_{11}P_{11}^{-1}S_{12} - P_{12})$$

$$\begin{aligned} & (P_{21}P_{11}^{-1}S_{11} - S_{21})[-(T_{11}P_{11}^{-1}S_{11} - P_{11})^{-1}](T_{11}P_{11}^{-1}S_{12} - P_{12}) = \\ &= P_{21}Q_{11}^{-1}Q_{12} - P_{21}P_{11}^{-1}P_{12} - hP_{21}P_{11}^{-1}Q_{12} - \\ & - Q_{21}Q_{11}^{-1}P_{11}Q_{11}^{-1}Q_{12} + Q_{21}Q_{11}^{-1}P_{12} + hQ_{21}Q_{11}^{-1}Q_{12}. \end{aligned}$$

6) Вычисление матрицы при векторе \widehat{V}_2

$$\begin{aligned} & P_{21}P_{11}^{-1}S_{12} - S_{22} + P_{21}Q_{11}^{-1}Q_{12} - P_{21}P_{11}^{-1}P_{12} - hP_{21}P_{11}^{-1}Q_{12} - \\ & - Q_{21}Q_{11}^{-1}P_{11}Q_{11}^{-1}Q_{12} + Q_{21}Q_{11}^{-1}P_{12} + hQ_{21}Q_{11}^{-1}Q_{12} = -P_{22} - \\ & - hQ_{22} + P_{21}Q_{11}^{-1}Q_{12} - Q_{21}Q_{11}^{-1}P_{11}Q_{11}^{-1}Q_{12} + Q_{21}Q_{11}^{-1}P_{12} + \\ & + hQ_{21}Q_{11}^{-1}Q_{12} = P_{21}Q_{11}^{-1}Q_{12} + Q_{21}Q_{11}^{-1}P_{12} - P_{22} - \\ & - Q_{21}Q_{11}^{-1}P_{11}Q_{11}^{-1}Q_{12} + h(Q_{21}Q_{11}^{-1}Q_{12} - Q_{22}). \end{aligned}$$

Теперь, с точностью до шага h , вычислительная схема (4.11) может быть записана следующим образом

$$\begin{aligned} & [P_{22} - P_{21}Q_{11}^{-1}Q_{12} - Q_{21}Q_{11}^{-1}P_{12} + Q_{21}Q_{11}^{-1}P_{11}Q_{11}^{-1}Q_{12}]\widehat{U}_2 + \\ & + [P_{21}Q_{11}^{-1}Q_{12} + Q_{21}Q_{11}^{-1}P_{12} - P_{22} - Q_{21}Q_{11}^{-1}P_{11}Q_{11}^{-1}Q_{12} + \\ & + h(Q_{21}Q_{11}^{-1}Q_{12} - Q_{22})]\widehat{V}_2 = \widehat{Z}_2. \end{aligned} \quad (4.12)$$

Видим, что в выражении (4.12) отсутствует матрица P_{11}^{-1} , что позволяет легко выделить варьируемые параметры.

С учетом выражений (4.1), (4.2) примем следующие обозначения:

$$- P = E_{11} + \frac{l}{cr^2} F_{12} (F_{22}^2)^{-1} F_{21} = E + \frac{l}{cr^2} P' \quad (4.13)$$

$$- Q = \frac{1}{cr} [F_{21} F_{22}^{-1} F_{12} - F_{11}] = \frac{1}{cr} Q' \quad (4.14)$$

С учетом этих обозначений запишем выражение (4.12). (индексы при матрицах соответствуют третьему этапу редукции).

1) Матрица при векторе \widehat{U}_2

$$\begin{aligned} & P_{22} - P_{21} Q_{11}^{-1} Q_{12} - Q_{21} Q_{11}^{-1} P_{12} + Q_{21} Q_{11}^{-1} P_{11} Q_{11}^{-1} Q_{12} = \\ & = [E_{22} + Q_{21}' (Q_{11}')^{-1} (Q_{11}')^{-1} Q_{12}'] + \\ & + \frac{l}{cr^2} [P_{22}' - P_{21}' (Q_{11}')^{-1} Q_{12}' - Q_{21}' (Q_{11}')^{-1} P_{12}' + \\ & + Q_{21}' (Q_{11}')^{-1} P_{11}' (Q_{11}')^{-1} Q_{12}'] = B_1 + \frac{l}{cr^2} B_2. \end{aligned}$$

2) Матрица при векторе \widehat{V}_2

$$\begin{aligned} & P_{21} Q_{11}^{-1} Q_{12} + Q_{21} Q_{11}^{-1} P_{12} - P_{22} - \\ & - Q_{21} Q_{11}^{-1} P_{11} Q_{11}^{-1} Q_{12} + h (Q_{21} Q_{11}^{-1} Q_{12} - Q_{22}) = \\ & = h \frac{1}{cr} B_3 - (B_1 + \frac{cr^2}{l} B_2). \end{aligned}$$

Итак, получена редуцированная схема вычислений в явной форме

$$[B_1 + \frac{l}{cr^2} B_2] \widehat{U}_2 + [h \frac{1}{cr} B_3 - (B_1 + \frac{l}{cr^2} B_2)] \widehat{V}_2 = \widehat{Z}_2. \quad (4.15)$$

Запишем ее в более привычной форме

$$\begin{aligned} & [B_1 + \frac{l}{cr^2} B_2] \widehat{X}(t_i) + [h \frac{1}{cr} B_3 - \\ & - (B_1 + \frac{l}{cr^2} B_2)] \widehat{X}(t_{i-1}) = hc^{-1} \widehat{Y}(t_{i-1}), \end{aligned} \quad (4.16)$$

где $\widehat{Y}(t_{i-1})$ — подвектор исходного вектора $\overline{Y}(t)$ системы (1.1).

Получен 1-й вариант искомой вычислительной формулы.

5. Алгоритм решения задачи

1. Сформировать систему (1.1), все матрицы которой должны быть структурными. На этом этапе можно считать, что номиналы всех элементов схемы одинаковы, т.е. $r = l = c$

и равны единице. Будем считать, что размеры первой, второй и третьей подсистем соответственно, равны n_1, n_2 , и n_3 .

2. Провести 1-й этап редукции, т.е. сформировать систему (2.2) размера $n_1 + n_2$. Для этого требуется обращение диагональной матрицы G_{33} , которая является почти единичной.

3. Провести 2-й этап редукции, вычислив числовые матрицы P и Q . Размер решаемых задач (3.1.3) и (3.1.4) становится равным n_1 .

4. Провести 3-й этап редукции, разбив системы (3.1.3) и (3.1.4) на две подсистемы размера M и m соответственно ($M + m = n_1$) так, чтобы во второй подсистеме содержались интересующие пользователя напряжения исходной схемы (к которым подключены конденсаторы) и ненулевой коэффициент исходного вектора $\overline{Y}(t)$. Вычислить числовые матрицы B_1, B_2 и B_3 .

5. Задать интересующие пользователя числовые значения r, l, c и подставить их в (4.16), получив числовой вариант подсистемы $m \ll M$. При этом шаг h может быть постоянным или переменным. Провести по (4.16) расчет динамических характеристик. Если они не устраивают пользователя, то указанный выше процесс можно повторять при других числовых значениях r, l, c . Таким образом, вычислительная схема (4.16) пригодна для быстрого многовариантного анализа исходной модели.

Литература

1. Новиков Л. С., Бабкин Г. В., Морозов Е. П., Колосов С. А., Крупников К. К., Милеев В. Н., Саенко В. С. Комплексная методология определения параметров электростатической зарядки, электрических полей и пробоев на космических аппаратах в условиях их радиационной электризации. Руководство для конструкторов. М.: Изд-во ЦНИИмаш, 1995. 160 с.

2. Тютнев А. П., Саенко В. С., Пожидаев Е. Д., Костюков Н. С. Диэлектрические свойства полимеров в полях ионизирующих излучений. М.: Наука, 2005. 453 с.

3. Измайлов А. С., Дорофеев А. Н., Саенко В. С., Тютнев А. П., Пожидаев Е. Д., Семенов В. Т. Структурная электрофизическая модель электризации космических аппаратов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2005. Т. 102. С. 210–219.

4. Laframboise G. et al. Results from a Two Dimensional Spacecraft-Charging Simulation and Comparison with a Surface Photocurrent Model // Spacecraft Charging-Technology-1980, NASA CP-2182. 1981. Pp. 709–716.

5. Davis V., Katz I., Mandell M., Gardner B. Spacecraft Charging Interactive Handbook // 6th Spacecraft Charging Technology Conference, 2000 AFRL-VS-TR-20001578.

6. Баталов Б. В., Егоров Ю. Б., Русаков С. Г. Основы математического моделирования больших интегральных схем на ЭВМ. М.: Радио и связь, 1982. 167 с.

7. *Востриков А. В., Абрамешин А. Е., Борисов Н. И.* Расчет наводок в бортовой кабельной сети космических аппаратов с помощью макро моделирования на основе методов Эйлера // Технологии ЭМС. 2012. № 40(1). С. 19–24.

8. *Борисов Н. И.* Исследование и разработка методов снижения размерности и трудоемкости задач анализа и оптимизации линейных эквивалентных электрических схем на основе макро моделирования в САПР: дис. ... докт. техн. наук. М: МИЭМ, 1996. 207 с.

9. *Баскаков А. Е., Борисов Н. И.* Алгоритм построения макро модели, основанный на идее метода определяющих величин // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2008. № 11. С. 93–98.

10. *Boyle S. R., Cohn B. M., Pederson D. O., Solomon J. E.* Macromodelling of integrated circuit operational amplifiers // IEEE J. 1974. Vol. SC-9. No. 6. Pp. 353–363.

11. *Glezner N., Weisang C.* Computer aided macro modelling of integrated circuit operational amplifiers // Proc. 1976 Int. Symp. Circuits and Systems. N.Y. April, 1976. Pp. 255–258.

12. *Solomon J. E.* The monolithic opamp: a tutorial study // IEEE J. 1974. Vol. SC-9. No. 6. Pp. 314–332.

13. *Hsueh M. Y., Pederson D. O.* An improved approach for macro modelling digital circuits // Proc. 1977 IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems, Phoenix, Arizona 1977. Pp. 692–695.

14. *Butler E. M.* Macromodels for switches and logic gates in circuit simulations // Proc. 1977 IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems, Phoenix, Arizona 1977. Pp. 692–695.

15. *Гришкин М. А., Винниченко К. В.* Разработка системы анализа эквивалентных электрических схем // Тезисы докладов XIII Международной студенческой школы-семинара «Новые информационные технологии» (Судак, 22–29 мая 2005). М.: МГИЭМ, 2005. С. 59–60.

BUILDING A MACROMODEL OF EQUIVALENT ELECTRICAL CIRCUIT THAT RETAINS A SIMPLE DEPENDENCE ON VARIABLE PARAMETERS OF THE ELECTROPHYSICAL MODEL

NIKOLAY I. BORISOV

Moscow, Russia, nborisov@hse.ru

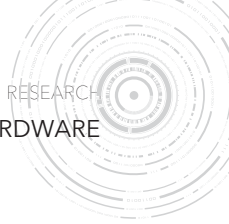
KEYWORDS: macromodel; equivalent electrical circuit; satellite antenna; spacecraft; electrostatic discharge.

ABSTRACT

To date, one of the most important problems in the operation of spacecraft is the occurrence of electrostatic discharges, which are the cause of onboard radioelectronic equipment failure. Such of electrostatic discharges are caused by the electrification of the spacecraft surface as a result of prolonged exposure to ionizing cosmic radiation. The theoretical and practical study of this problem has been the subject of many works by domestic and foreign authors.

In order to ensure reliable operation of the spacecraft of onboard radioelectronic equipment under the conditions of the periodic emergence of an electrostatic discharges, knowledge of the magnitudes of the interfering signals in the on-board cable network along the spacecraft outer surface is required. This requires a pattern machine simulation of the current spreading over the spacecraft sur-

face based on the results of which the requirements for the noise immunity of electronic units included in the spacecraft are formed. The linear equivalent electric circuit, consisting of a significant number of nodes and a uniformly covering spacecraft surface in the form of a grid, is often considered as the mathematical model used to study the current spreading. The tasks of analyzing such schemes are highly labor intensive and can require tens of machine time hours to solve them, which makes it difficult to carry out many tests for different of electrostatic discharges parameters and, as a result, increases the time needed to develop the onboard radioelectronic equipment. A formal method is proposed for constructing a macromodel of a linear equivalent electrical circuit formed over a communication satellite antenna. The macromodel can contain as many phase vari-



ables as the antenna designer wants. The macromodel maintains a simple dependence of its output characteristics on the design-technological variable parameters of the antenna model. The use of this approach allows reducing the complexity of calculations by several orders of magnitude.

REFERENCES

- Novikov L.S., Babkin G.V., Morozov E.P., Kolosov S.A., Krupnikov K.K., Mileev V.N., Saenko V.S. *Kompleksnaya metodologiya opredeleniya parametrov jelektricheskoy zaryadki, jelektricheskikh polej i probuev na kosmicheskikh apparatakh v usloviyakh ikh radiatsionnoj jelektrizatsii* [Complex methodology for determining the parameters of electrostatic charging, electric fields and breakdowns on spacecraft under the conditions of their radiation electrification. Guide for designers]. Moscow: TsNIImash, 1995. 160 p.
- Tyutnev A.P., Saenko V.S., Pozhidaev E.D., Kostyukov N.S. *Dijelektricheskie svoystva polimerov v polyakh ioniziruyushchikh izluchenij* [The dielectric properties of polymers in the fields of ionizing radiation]. Moscow: Nauka, 2005. 453 p.
- Izmailov A.S., Dorofeev A.N., Saenko V.S., Tyutnev A.P., Pozhidaev E.D., Semenov V.T. *Strukturnaya jelektrofizicheskaya model' jelektrizatsii kosmicheskikh apparatov* [Structural electrophysical model of spacecraft electrification]. *Electromechanical matters. VNIIEM studies*. 2005. Vol.102. Pp. 210-219.
- Laframboise G. et al. Results from a Two Dimensional Spacecraft-Charging Simulation and Comparison with a Surface Photocurrent Model. *Spacecraft Charging-Technology-1980, NASA CP-2182*. 1981. Pp. 709-716.
- Davis V., Katz I., Mandell M., Gardner B. *Spacecraft Charging Interactive Handbook. 6th Spacecraft Charging Technology Conference, 2000. AFRL-VS-TR-20001578*. 2000
- Batalov B.V., Egorov, Yu.B., Rusakov S.G. *Osnovy matematicheskogo modelirovaniya bol'shikh integral'nykh skhem na EVM* [Fundamentals of mathematical modeling of large integrated circuits on a computer]. Moscow: Radio i svyaz', 1982. 167 p.
- Vostrikov A.V., Abrameshin A.E., Borisov N.I. Calculation of electromagnetic hindrances in an onboard network of space vehicles by means of macromodeling on the basis of Euler's methods. *Tekhnologii EMS* [EMC Technologies]. 2012. No. 40 (1). Pp. 19-24.
- Borisov N.I. *Issledovanie i razrabotka metodov snizheniya razmernosti i trudoemkosti zadach analiza i optimizatsii linejnykh jekvivalentnykh jelektricheskikh skhem na osnove makromodelirovaniya v SAPR: dis. ... dokt.tekhn.nauk* [Research and development of methods for reducing the size and complexity of the tasks of analyzing and optimizing linear equivalent electrical circuits based on macromodelling in CAD. Dr. technical sci. diss]. Moscow, 1996. 207 p.
- Baskakov A.E., Borisov N.I. *Algoritm postroeniya makromodeli, osnovannyj na idee metoda opredelyayushchikh velichin* [Algorithm for constructing a macromodel based on the idea of the method of determining quantities]. *Novye informatsionnye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh* [New information technologies in automated systems]. 2008. No. 11. Pp. 93-98.
- Boyle S.R., Cohn B.M., Pederson D.O., Solomon J.E. *Macromodelling of integrated circuit operational amplifiers. IEEE J.* 1974. Vol. SC-9. No. 6. Pp. 353-363.
- Glezner N., Weisang C. *Computer aided macromodelling of integrated circuit operational amplifiers. Proc. 1976 Int. Symp. Circuits and Systems*. N.Y. April, 1976. Pp. 255-258.
- Solomon J.E. *The monolithic opamp: a tutorial study. IEEE J.* 1974. Vol. SC-9. No. 6. Pp. 314-332.
- Hsueh M.Y., Pederson D.O. *An improved approach for macromodelling digital circuits. Proc. 1977 IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems*. Phoenix, Arizona 1977. Pp. 692-695.
- Butler E.M. *Macromodels for switches and logic gates in circuit simulations. Proc. 1977 IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems*. Phoenix, Arizona 1977. Pp. 692-695.
- Grishkin M.A., Vinnichenko K.V. *Razrabotka sistemy analiza jekvivalentnykh jelektricheskikh skhem* [Development of equivalent circuit analysis system] *Tezisy dokladov XIII Mezhdunarodnoj studencheskoj shkoly-seminara "Novye informatsionnye tekhnologii"* [Abstracts of the XIII International student school-seminar "New information technologies (Sudak, 22-29 may 2005)]. Moscow, 2005. Pp. 59-60.

INFORMATION ABOUT AUTHOR:

Borisov N.I., PhD, Full Professor, Professor of the National Research University Higher School of Economics.



doi: 10.24411/2409-5419-2018-10255

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОРБИТЫ И ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

АБДУРАХИМОВ

Алексей Александрович¹

ЛЕВАНДОВИЧ

Александр Викторович²

МОСИН

Дмитрий Александрович³

СЕВЕРЕНКО

Александр Викторович⁴

Сведения об авторах:

¹д.т.н., доцент, начальник кафедры космических аппаратов и средств межорбитальной транспортировки Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия, alexvenis@mail.ru

²к.т.н., старший преподаватель кафедры космических аппаратов и средств межорбитальной транспортировки Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия, Lev-Alexander@yandex.ru

³к.т.н., доцент, докторант кафедры оперативного искусства и тактики Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия, mosin-da@mail.ru

⁴адъюнкт кафедры космических аппаратов и средств межорбитальной транспортировки Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия, severenko.al@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

На современном этапе освоения космического пространства перспективным направлением является создание и развитие космических систем на базе орбитальных группировок малых космических аппаратов массой до 500 кг. Интерес к созданию и использованию малых космических аппаратов, наметившийся в последние годы как за рубежом, так и в России, объясняется их относительно низкой стоимостью, сокращением сроков разработки и изготовления, а также удешевлением вывода на орбиту и эксплуатации таких аппаратов. Перед российскими разработчиками космических систем стоит задача создания на отечественной компонентной базе и повышения эффективности спутниковых систем в интересах различных потребителей (в том числе и в интересах решения задач дистанционного зондирования Земли). Обоснован выбор параметров орбиты для малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с учетом требуемого разрешения на местности. Проведены анализ существующих корректирующих двигательных установок для малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли и анализ применения существующих отечественных одно- и двухкомпонентных жидкостных ракетных двигателей и электроракетных двигательных установок для компенсации потерь скорости в результате действия аэродинамического сопротивления для различных классов малых космических аппаратов. Сформулирована математическая постановка задачи обоснования типа корректирующей двигательной установки и ее параметров для малых космических аппаратов. Предложена методика обоснования характеристик корректирующей двигательной установки низкоорбитального малого космического аппарата дистанционного зондирования Земли. Выполнен расчет зависимости массы корректирующей двигательной установки от суммарного импульса тяги для различных типов корректирующей двигательной установки. Выполнен расчет зависимости суммарного импульса тяги корректирующей двигательной установки, расходуемого на компенсацию аэродинамического сопротивления в течение одного года для различных малых космических аппаратов, функционирующих на низких круговых орбитах. На основании разработанной методики определены области рационального использования различных типов корректирующих двигательных установок для малых космических аппаратов различного целевого назначения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: малый космический аппарат; корректирующая двигательная установка; ракетный двигатель; солнечные батареи; электроракетные двигательные установки; жидкостные ракетные двигательные установки.

Для цитирования: Абдурахимов А.А., Левандович А.В., Мосин Д.А., Северенко А.В. Методика обоснования параметров орбиты и характеристик двигательной установки малого космического аппарата дистанционного зондирования Земли // Научные исследования в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 2. С. 12-23. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10255

Введение

Современный этап освоения космического пространства характеризуется развитием космических систем на базе орбитальных группировок (ОГ) малых космических аппаратов (МКА) массой до 500 кг. Интерес к созданию и использованию МКА, наметившийся в последние годы как за рубежом, так и в России, объясняется их относительно низкой стоимостью, сокращением сроков разработки и изготовления, а также удешевлением вывода на орбиту и эксплуатации таких аппаратов [1, 4–5].

Перед российскими разработчиками космических систем стоит задача повышения эффективности спутниковых систем в интересах Министерства обороны, а также минимизации расходов на космические аппараты за счет создания и широкого применения МКА, обладающими многими преимуществами перед большими спутниками. Так, они относительно недороги, легко модифицируются для решения определенной задачи, создают меньше радиопомех. Их применение способствует уменьшению рисков, связанных с запуском на орбиту и работой в космосе, снижая финансовые потери в случае отказа или утраты такого спутника. Действительно, низкоорбитальные системы имеют в своем составе много спутников, поэтому выход из строя одного или нескольких МКА не приводит к потере работоспособности системы [2–3].

Что очень важно, МКА обеспечивают значительное увеличение оперативности получения потребителем данных наблюдения за счет создания необходимой по численности группировки малых аппаратов. Большие одиночные спутники дистанционного зондирования среднего и высокого разрешения не могут быть источниками оперативной информации о заданном районе, поскольку имеют большой период повторения съемки. Например, американский *Landsat-7* производит повторную съемку того же района с периодичностью 16 суток, французский *Spot-5-2-3* суток, российский Ресурс-П — 3 суток [2–3].

В качестве МКА, способного решать задачи наблюдения в интересах различных потребителей, в том числе и специального назначения, целесообразно рассмотреть опытно-технологический малый космический аппарат «Аист-2Д». МКА «Аист-2Д» включает в себя инновационную аппаратуру для наблюдения поверхности Земли, научную аппаратуру для изучения околоземного космического пространства, а также его влияния на приборный состав, материалы и покрытия конструкции платформы. На борту МКА размещена оптико-электронная аппаратура высокого разрешения «Аврора». По сочетанию параметров «разрешение–полоса захвата» оптико-электронная аппаратура МКА «Аист-2Д» не имеет аналогов среди отечественных аппаратов. С высоты 490 км съемка земной поверхности в панхроматическом диапазоне электромагнитного излучения (ЭМИ) осуществляется с разрешением 1,48 м [4].

Особенностью рассматриваемого МКА является также то, что вся бортовая аппаратура, включая оптико-электронный комплекс, разработана изготовлена в России, преимущественно на отечественной электронно-компонентной базе.

Определение требуемых параметров орбиты малого космического аппарата наблюдения

Для определения требуемой высоты, которая обеспечит съемку земной поверхности в панхроматическом или мультиспектральном диапазоне электромагнитного излучения с требуемым линейным разрешением на местности, необходимо установить ограничения разрешающей способности целевой системы космического аппарата (КА). Для оптико-электронных систем КА целесообразно учитывать два типа ограничений их разрешающей способности: ограничение по дифракционному пределу оптической системы и ограничение по размеру ячейки (пикселя) оптико-электронного преобразователя.

Ограничение разрешающей способности целевой системы по дифракционному пределу определяется на основании выражения:

$$\delta_d = \frac{1.22\lambda}{D} \cdot H_{\text{диф}}, \quad (1)$$

где λ — среднее значение спектрального диапазона излучения, регистрируемого целевой системой КА;

D — диаметр входного отверстия оптической системы КА;

$H_{\text{диф}}$ — высота орбиты КА с учетом ограничения по дифракционному пределу.

Откуда требуемая высота будет равна:

$$H_{\text{диф}} = \frac{\delta_d D}{1.22\lambda}. \quad (2)$$

Ограничение разрешающей способности целевой системы по размеру пикселя оптико-электронного преобразователя определяется на основании следующего выражения:

$$\delta_f = \frac{d_f}{f} H_f, \quad (3)$$

где d_f — размер пикселя оптико-электронного преобразователя;

f — фокусное расстояние оптической системы;

H_f — высота орбиты КА с учетом ограничения по размеру пикселя оптико-электронного преобразователя.

Откуда требуемая высота будет равна:

$$H_f = \frac{\delta_f f}{d_f}. \quad (4)$$

Требуемая высота орбиты МКА наблюдения выбирается с учетом более жесткого ограничения.

Для МКА дистанционного зондирования Земли предпочтительно рассматривать солнечно синхронную орбиту. Прецессия солнечно синхронной орбиты вокруг оси Земли происходит с той же угловой скоростью, что и скорость Земли вокруг Солнца. Поэтому КА пересекает одну и ту же широту (северную или южную) в одно и то же солнечное время независимо от долготы или даты. Как правило, солнечно-синхронная орбита применяется для КА с пассивными оптическими и инфракрасными целевыми системами.

Наклонение солнечно-синхронной орбиты определяется по следующему выражению [6–7]:

$$i = \left[\operatorname{acos} \left[\frac{d\Omega}{-3 \cdot \pi \cdot I_2 \left(\frac{R_7}{R_7 + H} \right)} \right] \right] \cdot \frac{180}{\pi}, \quad (5)$$

где $d\Omega$ — скорость прецессии линии узлов;

e — относительный эксцентриситет;

H — высота орбиты;

k — гравитационный параметр Земли ($k=3,986 \cdot 10^{14} \text{ м}^3/\text{с}^2$);

R_3 — радиус Земли ($R_3 = 6371 \text{ км}$);

I_2 — коэффициент потенциала гравитационного поля земли ($I_2 = 1082.636 \cdot 10^{-6}$).

Для определения скорости прецессии линии узлов необходимо определить количество витков МКА вокруг Земли за одни сутки:

$$n = \frac{T_{\text{сут}}}{T_{\text{орб}}}, \quad (6)$$

где $T_{\text{сут}}$ — время одних суток;

$T_{\text{орб}}$ — период обращения МКА видовой разведки вокруг Земли.

Период обращения МКА вокруг Земли равен:

$$T_{\text{обр}} = 2 \cdot \pi \sqrt{\frac{(R_3 + H)^3}{k}}. \quad (7)$$

Скорость прецессии линии узлов равна:

$$d\Omega = \frac{2 \cdot \pi}{365.25 \cdot n}. \quad (8)$$

Для съемки земной поверхности в панхроматическом диапазоне ЭМИ с линейным разрешением 1,0 м высота орбиты МКА «АИСТ-2Д» должна составлять 333 км. На такой высоте необходимо компенсировать влияние

атмосферы с помощью корректирующей двигательной установки (КДУ). На рассматриваемом МКА отсутствует данная система. Поэтому необходимо провести обоснование типа КДУ для МКА «АИСТ-2Д».

Анализ существующих двигательных установок для малых космических аппаратов наблюдения

Эффективность применения МКА по целевому назначению во многом определяется возможностями их КДУ.

В процессе функционирования КА КДУ обеспечива-ет решение следующих задач [8]:

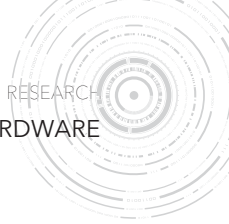
- довыведение КА на требуемую (целевую) орбиту после отделения от ракетносителя;
- поддержание в требуемых пределах параметров орбиты КА и баллистической структуры ОГ;
- изменение параметров орбиты КА для обеспечения решения целевых задач;
- увод с орбиты функционирования после окончания срока активного существования.

При проектировании КА одна из основных задач — это выбор типа КДУ. К основным требованиям, предъявляемым к КДУ со стороны КА, можно отнести тягу двигателя и суммарный импульс тяги (произведение тяги на суммарное время работы двигателя). Первый параметр определяет оперативность выполнения маневров, совершаемых с помощью двигательной установки, а второй — энергетические возможности двигательной установки (ДУ) по выполнению функциональных задач.

В качестве конкурирующих типов КДУ для МКА достаточно рассмотреть системы, применяемые на современных КА, реализация которых не представляет принципиальных затруднений: КДУ на основе двухкомпонентного жидкостного двигателя; КДУ на основе однокомпонентного жидкостного гидразинового двигателя; КДУ на основе стационарного плазменного двигателя (СПД), работающего на ксеноне.

При выборе необходимого типа КДУ для МКА в качестве критерия целесообразно использовать минимальную массу ДУ при ограничении на суммарный импульс тяги.

Также необходимо отметить, что современные МКА характеризуются слабо развитой энергетикой, так как на них не удается разместить солнечные батареи большой мощности. В связи с этим важной особенностью МКА является жесткое ограничение энергопотребления бортовой аппаратуры в целом и КДУ в частности. МКА массой около 450 кг как правило оснащаются солнечной батареей (СБ) площадью 5–7 м², электрическая мощность которой в начале срока активного существования не превышает 1500 Вт. Деградация СБ за пять лет функционирования составляет в среднем до 25%. Однако, с уменьшением массы МКА размеры и мощность СБ резко уменьшаются, что связано с системной миниатюризацией бортовой



аппаратуры КА. Для КА массой 100 кг площадь батареи будет $\sim 1,5 \text{ м}^2$, а ее мощность в начале САС составит всего около 150 Вт. Следовательно, при создании МКА необходимо учитывать ограничения по энергопотреблению бортовой аппаратурой в целом и КДУ в частности. Кроме того, большинство МКА оснащаются неориентируемыми СБ, что снижает эффективность фотоэлектрических преобразователей. Поэтому в качестве двигательных установок на МКА должны применяться установки с небольшой ценой тяги — порядка 40 Вт/г, при этом суммарное потребление КДУ должно составить не более 200–250 Вт [9–10, 17].

Корректирующие двигательные установки с двухкомпонентным жидкостным двигателем. Двухкомпонентные маршевые жидкостные ракетные двигательные установки (ЖРДУ) нашли широкое применение для КА различного назначения: видовой разведки, связи, радио- и радиотехническая разведки, дистанционного зондирования Земли и др. Основным достоинством ЖРДУ являются высокие значения тяговооруженности, которые они способны обеспечить КА, а следовательно, и высокая оперативность маневрирования. Однако невысокая экономичность данного типа ДУ по сравнению с электроракетными двигателями, которая количественно оценивается величиной удельного импульса, не позволяет обеспечить высокие маневренные возможности и большой срок активного существования КА. Нужно подчеркнуть, что в классе химических двигателей двухкомпонентные ЖРДУ обладают самым высоким удельным импульсом. На настоящем этапе развития космических систем сложилась ситуация, когда возможности по совершенствованию ЖРДУ практически полностью исчерпаны и ограничены незначительным улучшением энергомассовых характеристик. Для ЖРДУ предельные значения удельного импульса составляют $5 \cdot 10^3 \text{ м/с}$.

Двухкомпонентные ДУ, применяемые на КА, обычно работают на традиционных компонентах топлива — азотном тетроксиде и несимметричном диметилгидразине. Выбор данных компонентов ракетного топлива определялся в первую очередь их физико-техническими характеристиками. Двухкомпонентные ДУ применяются в основном на больших КА для точной ориентации, стабилизации и коррекции орбиты, проведения манёвров по стыковке и расстыковке с другими аппаратами, отличаются стабильностью характеристик, быстродействием, многообразием включений, длительностью включений от сотых долей секунды до сотен и тысяч секунд [11].

Корректирующие двигательные установки с гидразиновым двигателем. Одно из достоинств гидразиновых ракетных двигателей — это прозрачный факел, обеспечивающий надежную работу бортовых астрофизических приборов.

КДУ на основе термokatалитического двигателя (ТКД) характеризуются очень низкой ценой тяги, составляющей 1–0,5 Вт/г. Однако главным же недостатком является сравнительно низкий удельный импульс, равный 2200–2400 м/с, что приводит к наличию запасов топлива на борту КА и, как следствие, увеличению габаритов и массы. Принцип действия ТКД основан на термическом разложении рабочего тела в присутствии катализатора. В качестве рабочего тела используется гидразин — наиболее высокоэнергетическое топливо среди известных однокомпонентных эндотермических видов топлива. В двигателе рабочее тело под воздействием катализатора разлагается на аммиак и азот. При этом часть аммиака, в свою очередь, разлагается на азот и водород. В результате реакции разложения гидразина выделяется тепло, подогревающее продукты разложения до 900°C . Наряду с энергетическими достоинствами гидразин обладает и существенными недостатками. Во-первых, данное рабочее тело является токсичным и ядовитым, а также весьма нестабильным веществом, что вызывает необходимость особых условий при работе с гидразином на этапе наземной эксплуатации (при заправке и проверке ДУ). Во-вторых, гидразин имеет относительно высокую температуру замерзания $+1,7^\circ \text{C}$, поэтому в гидразиновых ДУ должно быть обеспечено термостатирование блоков и трубопроводов установки.

Гидразиновые ДУ имеют богатую летную историю и хорошо зарекомендовали себя на отечественных и зарубежных КА, в том числе на КА «Глонасс-М», «Экспресс-АМ» и «SESAT». Применение их на МКА затруднено большим запасом рабочего тела, габаритами блока хранения и подачи рабочего тела. Однако возможность достичь низкого (до 30 Вт) потребления КДУ заставляет мириться с этими недостатками. Примером применения гидразиновой КДУ может служить МКА «Можаяец».

Корректирующие двигательные установки со стационарным плазменным двигателем. Электроракетные двигательные установки (ЭРДУ) на основе СПД в настоящее время используются для коррекции орбиты КА [7, 9, 12–14]. Высокий удельный импульс, достигающий 15000–16000 м/с (при напряжении разряда 300 В) обуславливает топливную экономичность таких ДУ. В целом области применения ЭРДУ очевидны: это задачи, требующие выработки значительного суммарного импульса, порядка десятков и сотен тонна-секунд ($\sim 10^6 \text{ Н} \cdot \text{с}$). В этой области ЭРДУ находятся вне конкуренции, так как по расходу рабочего тела они намного экономичнее ДУ на химическом топливе. Однако при этом высоким оказывается и потребление электрической мощности, необходимой для работы СПД, что обуславливает высокую цену тяги (до 200 Вт/г).

Использование в качестве рабочего тела инертного газа (ксенона), делает такую КДУ экологически чистой, а работу с ней безопасной. Кроме того, для такого рабо-

чего тела используется простая и надежная система хранения и подачи.

В настоящее время ведущие российские предприятия занимаются созданием КА различного назначения с ЭРДУ малой и средней мощности. Как правило, применяются ЭРДУ на основе ЭРД СПД-50, СПД-70, СПД-100 разработки ОКБ «Факел».

В РКК «Энергия» разработаны и проходят успешную летную эксплуатацию КА «Ямал-100», «Ямал-200» с ДУ на базе восьми СПД-70 мощностью 660 Вт, тягой 40 мН, удельным импульсом 1450 с. На базе данных ЭРД в ГКНПЦ им М. В. Хруничева разработаны КА «Kazsat-1» и «Kazsat-2». В научно-производственном предприятии ВНИИЭМ создан МКА «Канопус-В» с ДУ на базе двух ЭРД СПД-50 с удельным импульсом 1250 с. Там же разработан КА «АРКОН-2М» с двумя двигателями СПД-100В с тягой 83 мН, мощностью 1350 Вт и удельным импульсом 1600 с. В ОАО «ИСС имени академика М. Ф. Решетнева» создаются КА на базе спутниковой платформы семейства «Экспресс-1000» (малые и средние КА), а также геостационарные КА серии «Луч»

на базе космической платформы «Экспресс-2000», которые оснащаются двигателями СПД-100.

Необходимо отметить, что на данном этапе развития космической техники КДУ на основе ксеноновых СПД прочно заняли нишу электроракетных двигательных установок (ЭРДУ), применяемых для коррекции орбиты тяжелых КА (в первую очередь геостационарных связных объектов) с большими сроками активного существования и развитой энергетикой в силу высокой степени отработанности и надежности, а также хороших массогабаритных показателей. Следует также отметить, что КА развиваются как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения их массы. Для СПД представляют интерес МКА с массой от 50 до 600 кг. Если принять, что КА может выделить для работы ЭРДУ мощность ~ 1 Вт/кг, то для такой ЭРДУ необходимы двигатели с мощностью в диапазоне 50–500 Вт. Для диапазона мощностей 200–500 Вт подходит уже существующий летный вариант двигателя СПД-50. В таблице представлены удельные массовые и энергетические характеристики элементов КДУ [8, 9–10].

Удельные массовые и энергетические характеристики элементов КДУ [8–10, 16]

Характеристики элементов КДУ	Значение
Тяга ЭРД СПД-25	7 мН
Потребляемая электрическая мощность ЭРД СПД-25	100 Вт
Удельный импульс ЭРД СПД-25	8000-10000 м/с
Удельная масса ЭРД СПД-25 $\gamma_{дв}$	3Ч
Тяга ЭРД СПД-50	20 мН
Потребляемая электрическая мощность ЭРД СПД-50	200-600 Вт
Удельный импульс ЭРД СПД-50	до 17500 м/с
Удельная масса ЭРД СПД-50 $\gamma_{дв}$	4Ч
Относительная масса системы хранения и подачи ЭРДУ $k_{схп}$	0,04
Относительная масса комплекса обеспечивающих систем ЭРДУ $k_{кос}$	0,08
Удельная масса СПУ	4Ч
Относительная масса элементов конструкции ЭРДУ k_k	0,025
Удельная масса энергоустановки $\gamma_{эу}$	0,012 кг/Вт
Тяговая удельная масса двухкомпонентного ЖРД $\gamma_{дв.т}$	2Ч
Относительная масса системы хранения и подачи двухкомпонентной ЖРДУ $k_{схп}$	0,08
Относительная масса комплекса обеспечивающих систем двухкомпонентной ЖРДУ $k_{кос}$	0,025
Относительная масса элементов конструкции двухкомпонентной ЖРДУ k_k	0,025
Тяговая удельная масса однокомпонентного ЖРД $\gamma_{дв.т}$	3Ч
Относительная масса системы хранения и подачи однокомпонентной ЖРДУ $k_{схп}$	0,04
Относительная масса комплекса обеспечивающих систем однокомпонентной ЖРДУ $k_{кос}$	0,02
Относительная масса элементов конструкции однокомпонентной ЖРДУ k_k	0,015



Использование в составе КА системы электроснабжения на основе солнечных (арсенид галлия) и аккумуляторных (литий-ионных) батарей расширяет область рационального использования ЭРДУ на основе СПД.

Методика обоснования характеристик корректирующей двигательной установки низкоорбитального малого космического аппарата наблюдения

При выборе необходимого типа КДУ для МКА в качестве критерия целесообразно использовать минимальную массу ДУ при ограничении на суммарный импульс тяги.

КДУ МКА в первую очередь должна компенсировать силу аэродинамического сопротивления. Тяга КДУ должна в несколько раз превышать силу аэродинамического сопротивления, которую можно оценить по следующей формуле:

$$F_{\text{сопр}} = C_x \frac{\rho V^2}{2} S, \quad (9)$$

где C_x — коэффициент лобового сопротивления;
 ρ — плотность атмосферы на высоте полета КА;
 V — скорость КА;
 S — площадь мишеля.

Скорость КА на круговой орбите определяется выражением:

$$V_0 = \sqrt{\frac{k}{R_3 + H}}, \quad (10)$$

где k — гравитационный параметр Земли ($k = 3,986 \cdot 10^{14} \text{ м}^3/\text{с}^2$);
 R_3 — радиус Земли;
 H — высота орбиты КА.

Масса КДУ в основном определяется потребной величиной суммарного импульса тяги, под которым понимается произведение тяги на суммарное время работы ДУ. С другой стороны, для компенсации аэродинамического сопротивления суммарный импульс тяги должен быть равен суммарному импульсу силы аэродинамического сопротивления за всё время функционирования МКА:

$$I_{\Sigma} = Pt_{\text{КДУ}_{\Sigma}}. \quad (11)$$

Далее необходимо произвести декомпозицию КДУ на следующие основные элементы:

- рабочее тело ракетного двигателя;
- энергетическая установка (ЭУ);
- система преобразования и управления (СПУ) электрической мощностью;
- система хранения и подачи рабочего тела (СХП);
- ракетный двигатель (РД);
- комплекс обеспечивающих систем (КОС);
- конструкция КДУ.

С учетом вышеуказанного массовый анализ разбивки ДУ на составные элементы выражение для массы КДУ можно представить следующим образом [8]:

$$M_{\text{КДУ}} = M_{\text{РТ}} + M_{\text{ЭУ}} + M_{\text{СПУ}} + M_{\text{СХП}} + M_{\text{ДВ}} + M_{\text{КОС}} + M_{\text{К}}, \quad (12)$$

где $M_{\text{РТ}}$ — масса топлива КДУ;
 $M_{\text{ЭУ}}$ — масса энергоустановки (для ЭРДУ);
 $M_{\text{СПУ}}$ — масса СПУ (для ЭРДУ);
 $M_{\text{СХП}}$ — масса СХП;
 $M_{\text{ДВ}}$ — масса ракетного двигателя;
 $M_{\text{КОС}}$ — масса КОС КДУ;
 $M_{\text{К}}$ — масса элементов конструкции КДУ.

Выражение для массы рабочего тела, необходимой для выполнения требуемых маневров, имеет вид:

$$M_{\text{РТ}} = \frac{I_{\Sigma}}{I_{\text{уд}}}, \quad (13)$$

где $I_{\text{уд}}$ — удельный импульс КДУ.

Система хранения и подачи рабочего тела включает в себя баки для рабочего тела, трубопроводы, устройства для подачи рабочего тела из баков к ракетным двигателям. Масса системы хранения и подачи в основном определяется массой рабочего тела:

$$M_{\text{СХП}} = k_{\text{СХП}} M_{\text{РТ}}, \quad (14)$$

где $k_{\text{СХП}}$ — относительная масса системы хранения и подачи рабочего тела.

Энергоустановка служит для генерирования электрической энергии, необходимой для работы ЭРДУ:

$$M_{\text{ЭУ}} = \gamma_{\text{ЭУ}} N_{\text{эл}} v_{\text{КДУ}}, \quad (15)$$

где $\gamma_{\text{ЭУ}}$ — удельная масса энергетической установки (для энергетической установки на основе солнечных батарей $\gamma_{\text{ЭУ}} = 5 \cdot 10^{-3} - 15 \cdot 10^{-3} \text{ кг/Вт}$);

$v_{\text{КДУ}}$ — коэффициент, учитывающий периодический характер работы двигательной установки, $v_{\text{КДУ}} = \frac{F_{\text{сопр}}}{P}$.

СПУ предназначена для преобразования параметров электрической энергии, вырабатываемой ЭУ. Выражение для массы СПУ имеет вид [11]:

$$M_{\text{СПУ}} = \gamma_{\text{СПУ}} N_{\text{эл}} \eta_{\text{СПУ}}, \quad (16)$$

где $\gamma_{\text{СПУ}}$ — удельная масса СПУ ($\gamma_{\text{СПУ}} = 2 \cdot 10^{-3} - 4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/Вт}$).

Комплекс обеспечивающих систем содержит элементы автоматики, систему обеспечения теплового режима КДУ, систему стабилизации КА на активных участках полета. Масса комплекса обеспечивающих систем определяется массой КДУ:

$$M_{\text{КОС}} = k_{\text{КОС}} M_{\text{КДУ}}, \quad (17)$$

где $k_{\text{КОС}}$ — относительная масса КОС КДУ.

Под конструкцией КДУ понимают элементы, объединяющие перечисленные выше агрегаты и системы в единое целое и обеспечивающие передачу тяги от ДУ к КА.

Масса элементов конструкции ЖРДУ пропорциональна сумме масс элементов ЖРДУ:

$$M_{\text{К_ЖРДУ}} = k_{\text{к_жрду}} (M_{\text{РТ}} + M_{\text{СХП}} + M_{\text{ДВ}} + M_{\text{КОС}}), \quad (18)$$

где $k_{\text{к_жрду}}$ — относительная масса элементов конструкции ЖРДУ.

Выражение для массы элементов конструкции ЭРДУ имеет вид:

$$M_{\text{К_ЭРДУ}} = k_{\text{к_эрдуду}} (M_{\text{ДВ}} + M_{\text{ЭУ}} + M_{\text{СПУ}} + M_{\text{РТ}} + M_{\text{СХП}} + M_{\text{КОС}}), \quad (19)$$

где $k_{\text{к_эрдуду}}$ — относительная масса элементов конструкции ЭРДУ.

Массу ракетного двигателя целесообразно выбрать из каталога продукции отечественных производителей ФГУП ОКБ «Факел», ФГУП «Центр Келдыша» и КБХМ им. А.М. Исаева. Подставив выражения (13), (14), (17), (18) в выражение (12), после преобразований получаем расчетную формулу для массы ЖРДУ:

$$M_{\text{ЖРДУ}} = \frac{\frac{I_{\Sigma}}{I_{\text{уд}}} (1 + k_{\text{СХП}} + k_{\text{К}} + k_{\text{К}} k_{\text{СХП}}) + M_{\text{ДВ}} (1 + k_{\text{К}})}{1 - k_{\text{КОС}} - k_{\text{К}} k_{\text{КОС}}}. \quad (20)$$

Подставив выражения (13)–(17) и (19) в выражение (12), после преобразований получаем расчетную формулу для массы ЭРДУ:

$$M_{\text{ЭРДУ}} = \frac{\frac{I_{\Sigma}}{I_{\text{уд}}} (1 + k_{\text{СХП}} + k_{\text{К}} + k_{\text{К}} k_{\text{СХП}}) + M_{\text{ДВ}} (1 + k_{\text{К}})}{1 - k_{\text{КОС}} - k_{\text{К}} k_{\text{КОС}}} + \frac{N_{\text{эл}} v_{\text{ДУ}} [\gamma_{\text{СПУ}} \eta_{\text{СПУ}} + \gamma_{\text{ЭУ}} + k_{\text{К}} \gamma_{\text{ЭУ}} + k_{\text{К}} \gamma_{\text{СПУ}} \eta_{\text{СПУ}}]}{1 - k_{\text{КОС}} - k_{\text{К}} k_{\text{КОС}}}. \quad (21)$$

На рис. 1 представлена зависимость массы КДУ от потребного запаса суммарного импульса тяги ДУ для компенсации потерь скорости в результате действия аэродинамического сопротивления для различных классов МКА полученная с помощью представленной методики.

Для примера рассматривались следующие типы ДУ: КДУ на основе двухкомпонентного жидкостного двигателя; КДУ на основе однокомпонентного жидкостного гидразинового двигателя; КДУ на основе стационарного плазменного двигателя СПД 25 и СПД-50. Выбор СПД

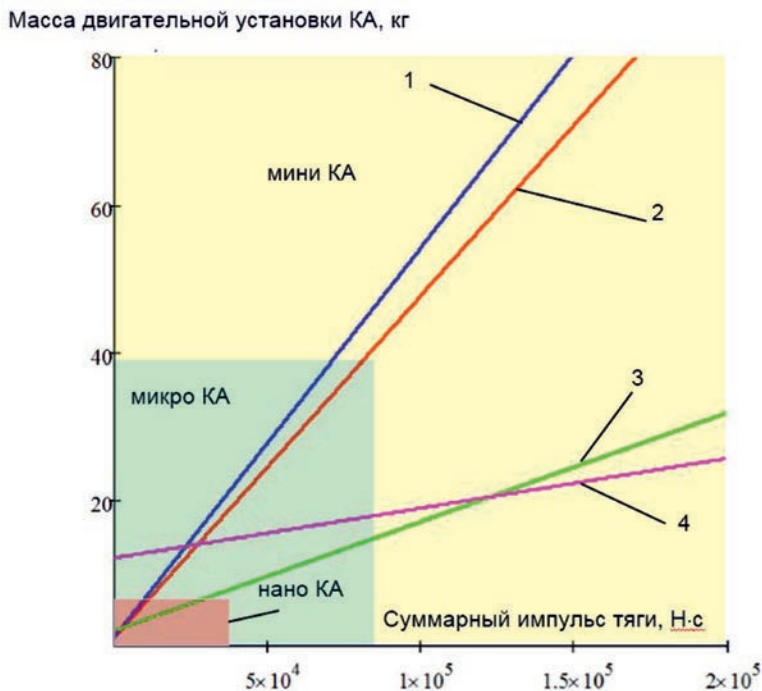


Рис. 1. Зависимость массы двигательной установки от суммарного импульса тяги:
 1 — однокомпонентная ЖРДУ (гидразин); 2 — двухкомпонентная ЖРДУ (АТ+НДМГ);
 3 — ЭРДУ с СПД-25 (ксенон); 4 — ЭРДУ с СПД-50 (ксенон)

ограничивается энергопотреблением. В качестве энергетической установки для электропитания СПД рассматривалась солнечная батарея на основе арсенид-галлиевых фотоэлектрических преобразователей.

Удельные массовые и энергетические характеристики элементов КДУ приведены в (см. табл.). Данные значения принимались с учетом современного состояния двигателных и энергетических установок [15].

Характеристики современных двигательных установок показывают, что в классе мини-КА выгодно использовать экономичные ЭРД. Однако, необходимо понимать, что выполнение маневров с использованием ЭРД требует больших временных затрат, что необходимо учитывать при формировании циклограмм функционирования КА. В классе микро-КА существуют области как для ЖРД, так и для ЭРД. Для аппаратов массой менее 10 кг целесообразно применять КДУ на основе однокомпонентного ЖРД. Стоит отметить, что в настоящее время активно ведутся работы по созданию однокомпонентных ЖРД на основе так называемого зеленого топлива, которые в перспективе должны заменить токсичные гидразиновые двигатели. ОКБ «ФАКЕЛ» планирует разработать линейку ЖРД в этих целях. «Зеленые топлива» по сравнению с гидразином имеют следующие преимущества:

- в 1,4 раза большую плотность рабочего тела;
- замерзают при температурах ниже $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- относятся к третьему классу опасности, что упрощает хранение, транспортировку и работу с ним;
- имеют высокую температуру разложения (свыше $1800\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Основной проблемой на текущий момент является отсутствие конструкционного материала, способного выдержать такую высокую температуру совместно с интенсивной реакцией окисления.

Для ЭРДУ целесообразно не руководствоваться выбором существующих ЭРД, а определить оптимальное значение потребляемой мощности, соответствующее минимальному значению массы ДУ. Для этого необходимо выполнить ряд допущений:

- тяга ЭРДУ и высота орбиты заданы;
- удельные характеристики элементов ЭРДУ не зависят от электрической мощности, потребляемой ЭРД.

Масса рабочего тела ЭРДУ равна:

$$M_{РТ} = \dot{m} t_{КДУ_Σ}, \quad (22)$$

где \dot{m} — расход рабочего тела в единицу времени (кг/с).

Поскольку расход рабочего тела равен:

$$\dot{m} = \frac{P}{I_{уд}}, \quad (23)$$

где P — тяга ЭРДУ,

то масса РТ будет равна:

$$M_{РТ} = \frac{P t_{КДУ_Σ}}{I_{уд}}, \quad (24)$$

Так как электрическая мощность, потребляемая ЭРДУ, связана с ее тягой и удельным импульсом известным соотношением:

$$N_{эл} = \frac{P I_{уд}}{2 \eta_{ЭРДУ}}, \quad (25)$$

где $\eta_{ЭРДУ}$ — КПД ЭРДУ,

то масса рабочего тела равна:

$$M_{РТ} = \frac{P^2 t_{КДУ_Σ}}{I_{уд}} \frac{1}{N_{эл}}, \quad (26)$$

С учетом полученных соотношений (13) и (26) формула (21) для массы ЭРДУ примет вид:

$$M_{ЭРДУ} = \frac{I_{Σ}^2}{2 \eta_{ЭРД} N_{эл} t_{ΣЭРД}} (1 + k_{СХП} + k_K + k_K k_{СХП}) + M_{лв} (1 + k_K) + \frac{N_{эл} v_{ДУ} [\gamma_{спу} \eta_{спу} + \gamma_{эу} + k_K \gamma_{эу} + k_K \gamma_{спу} \eta_{спу}]}{1 - k_{КОС} - k_K k_{КОС}}. \quad (27)$$

С учетом выражения (27) получена зависимость массы ЭРДУ от потребляемой электрической мощности при сроке активного существования 5 лет и тяге ЭРД 0,08 Н (рис. 2).

Анализ результатов показывают, что существует оптимальное значение $N_{эл}$, соответствующее минимальному значению массы ЭРДУ. Для определения оптимального

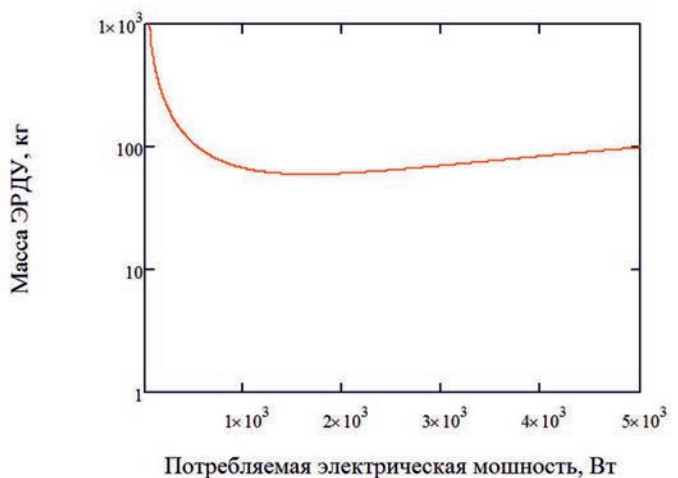


Рис. 2. Зависимость массы ЭРДУ от потребляемой электрической мощности

значения $N_{эл}$ необходимо продифференцировать выражение (27) и приравнять к нулю производную массы ЭРДУ по $N_{эл}$:

$$\frac{\partial M_{ЭРДУ}}{\partial N_{эл}} = 0 \quad (28)$$

Решив полученное уравнение относительно $N_{эл}$, найдем значение электрической мощности в точке экстремума — точке минимума массы ЭРДУ:

$$N_{ЭЛОПТ} = \sqrt{\frac{\frac{I_{сум}^2}{2\eta_{эрд} t_{сум}} (1 + k_{СХП} + k_K + k_K k_{СХП})}{(1 - k_{КОС} - k_K k_{КОС})} \cdot \frac{[v_{ду} (\gamma_{эу} + \gamma_{эу} k_K + \eta_{спу} \gamma_{спу} + k_K \eta_{спу} \gamma_{спу})]}{(1 - k_{КОС} - k_K k_{КОС})}} \quad (29)$$

Таким образом, оптимальная электрическая мощность ЭУ $N_{эл}^{opt}$ будет определяться потребным суммарным импульсом, продолжительностью коррекции, КПД ЭРДУ, а также суммарной удельной массой ЭДС. На основании полученной оптимальной электрической мощности производится расчет ЭРД.

Для оценки затрат на поддержание орбиты КА (рис. 3) показаны зависимости суммарного импульса тяги КДУ, расходуемого на компенсацию аэродинамического сопротивления в течение одного года для различных МКА, функционирующих на низких круговых орбитах.

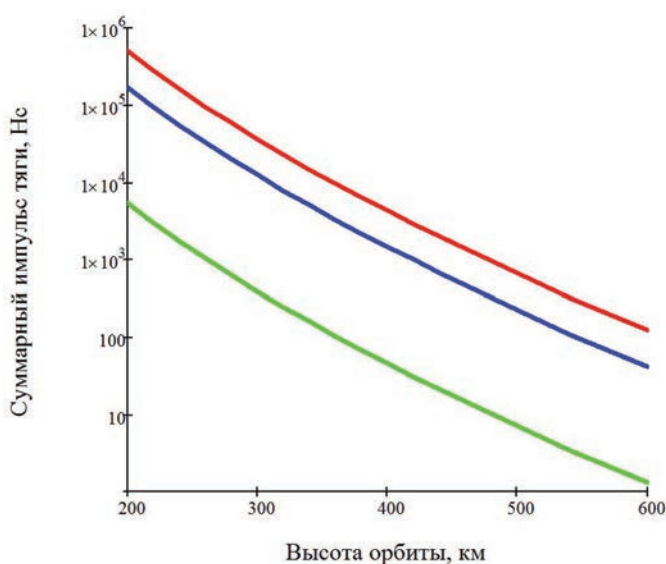


Рис. 3. Затраты суммарного импульса тяги на компенсацию аэродинамического сопротивления в течение года:
 1 — мини-КА ($S_m = 1,12 \text{ м}^2$); 2 — микро-КА ($S_m = 0,385 \text{ м}^2$);
 3 — нано-КА ($S_m = 0,012 \text{ м}^2$)

Заключение

В современных условиях перед российскими разработчиками космических систем стоит задача создания на отечественной компонентной базе и повышения эффективности спутниковых систем в интересах различных потребителей, а также минимизации расходов на космические аппараты за счет создания и широкого применения МКА, которые относительно недороги, легко модифицируются для решения определенной задачи, создают меньше радиопомех. Их применение способствует уменьшению рисков, связанных с запуском на орбиту и работой в космосе, снижая финансовые потери в случае отказа или утраты такого спутника.

В настоящей статье предложены подходы и способы обоснования параметров орбиты и характеристик двигательной установки МКА дистанционного зондирования земли и были получены следующие результаты:

- обоснован выбор параметров орбиты для малога КА наблюдения с учетом требуемого разрешения на местности;
- выполнен анализ применения существующих отечественных одно- и двухкомпонентных ЖРДУ и ЭРДУ для компенсации потерь скорости в результате действия аэродинамического сопротивления для различных классов МКА;
- сформулирована математическая постановка задачи обоснования типа КДУ и ее параметров для МКА. Основными параметрами необходимо считать суммарную массу КДУ, ее тягу, удельный импульс и потребляемую электрическую мощность;
- предложена методика обоснования характеристик корректирующей двигательной установки низкоорбитального малогабаритного космического аппарата наблюдения
- выполнен расчет зависимости массы двигательной установки от суммарного импульса тяги для различных типов КДУ;
- выполнен расчет зависимости суммарного импульса тяги КДУ, расходуемого на компенсацию аэродинамического сопротивления в течение одного года для различных МКА, функционирующих на низких круговых орбитах.

Литература

1. Разработка систем космических аппаратов / под ред. П. Фортегско, Г. Суайнерда, Д. Старка; Пер. с англ. М.: Альпина Паблишер, 2015. 765 с.
2. Мосов С. П. Аэрокосмическая разведка в современных военных конфликтах: Монография. К.: Румб, 2008. 248 с.
3. Остапенко О. Н., Баушев С. В., Морозов И. В. Информационно-космическое обеспечение группировок войск (сил) ВС РФ. СПб.: Любавич, 2012. 368 с.: ил.



4. Опытнo-технологический малый космический аппарат «АИСТ-2Д». Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2017. 324 с.

5. Космический комплекс оперативного мониторинга технологических и природных чрезвычайных ситуаций «Канопус-В» с космическим аппаратом «Канопус-В» № 1. М.: Изд-во НПП ВНИИЭМ, 2011. 110 с.

6. *Баринoв К. Н., Бурдаев М. Н., Мамон П. А.* Динамика и принципы построения орбитальных систем космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1975. 232 с.

7. *Баринoв К. Н., Мамон П. А.* Теория полета космических аппаратов. М.: МО СССР, 1974. 346 с.

8. *Ермолаев В. И., Чилин Ю. Н., Наркевич Н. Н.* Двигательные и энергетические установки космических летательных аппаратов / под ред. А. П. Ковалева. СПб.: Изд-во ЦКБ «Рубин», 2003. 558 с.

9. *Ходненко В. П., Хромов А. В.* Корректирующие двигательные установки для малого космического аппарата // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2009. Т. 108. № 2. С. 27–32.

10. *Лесневский В. А., Малахова Л. И., Михайлов М. В., Ходненко В. П., Хромов А. В.* Электрореактивная двигательная установка космического аппарата «Канопус-В» и ее огневые испытания // Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 319. № 4. С. 144–147.

11. *Синяевский В. В., Тютюкин А. Е., Уртминцев И. А., Мосин Д. А., Левандович А. В.* Двигательные установки космических летательных аппаратов: в 2 ч. Ч. 2: Электро-

ракетные двигатели и двигательные установки на их основе / под ред. проф. В. В. Синяевского. СПб.: Изд-во ВКА имени А. Ф. Можайского, 2015. 131 с.

12. *Горшков О. А., Муравлев В. А., Шагайда А. А.* Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов / под ред. академика РАН А. С. Коротеева. М.: Машиностроение, 2008. 280 с.

13. *Ермошкин Ю. М.* Области рационального применения электрореактивных двигательных установок на космических аппаратах прикладного назначения // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. 2011. № 2 (35). С. 109–113.

14. *Гусев Ю. Г., Пильников А. В.* Роль и место электроракетных двигателей в Российской космической программе // Труды МАИ. 2012. № 60. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35385> (дата обращения 05.02.2018).

15. Стационарные плазменные двигатели: URL: <http://www.fakel-russia.com> (дата обращения 05.02.2018).

16. Жидкостные ракетные двигатели малой тяги от 0,5 до 250 кгс. URL: <http://www.kbhmisaeva.ru>. (дата обращения 05.02.2018).

17. *Боязитов С. Ю., Вастрюков В. Ф., Деев В. Е., Катасонов Н. М., Михайлов М. В., Подоплелов И. А.* Система электропитания корректирующей двигательной установки малого космического аппарата // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 316. № 4. С. 97–101.





TECHNIQUE FOR SUBSTANTIATING THE PARAMETERS OF ORBIT AND CHARACTERISTICS OF THE MOTOR INSTALLATION OF A SMALL SPACE APPARATURE FOR REMOTE SENSING OF THE EARTH

ALEXSEY A. ABDURAHIMOV,

St-Peterburg, Russia, alexvenis@mail.ru

ALEXANDER V. LEVANDOVICH,

St-Peterburg, Russia, Lev-Alexander@yandex.ru

DMITRY A. MOSIN,

St-Peterburg, Russia, mosin-da@mail.ru

ALEXANDER V. SEVERENKO,

St-Peterburg, Russia, severenko.al@yandex.ru

KEYWORDS: small spacecraft; corrective propulsion; rocket engine; solar panels; electric propulsion systems; liquid rocket propulsion systems.

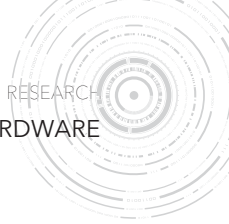
ABSTRACT

At the present stage of space exploration, a promising direction is the creation and development of space systems based on orbital groupings of small spacecraft weighing up to 500 kg. The interest in the creation and use of small spacecraft, which has emerged in recent years both abroad and in Russia, is due to their relatively low cost, reduced development and manufacturing times, as well as cheaper placement into orbit and operation of such vehicles. Russian space system developers are faced with the task of creating satellite systems on the domestic component base and increasing the efficiency of satellite systems in the interests of various consumers (including the interests of solving the problems of Earth remote sensing). The work substantiates the choice of orbital parameters for small spacecraft for remote sensing of the Earth, taking into account the required resolution on the ground. Analysis of existing corrective propulsion systems for small Earth remote sensing spacecraft and analysis of the use of existing domestic one- and two-component liquid rocket engines and electric rocket propulsion systems to compensate for the loss of speed due to the action of aerodynamic resistance for various classes of small spacecraft. The mathematical formulation of the problem of justifying the type of a corrective propulsion system and its parameters for small spacecraft is formulated. A method is proposed for substantiating the characteristics of a corrective propulsion system of a low-orbit small space vehicle for remote sensing of the Earth. The dependence of the mass of the corrective propulsion system on the total thrust impulse

was calculated for various types of corrective propulsion systems. The calculation of the dependence of the total impulse of the corrective propulsion system, spent on the compensation of the aerodynamic drag for one year for various small spacecraft operating in low circular orbits, is carried out. On the basis of the developed methodology, the areas of rational use of various types of corrective propulsion systems for small spacecraft of various purposes are identified.

REFERENCES

1. Fortescue P., Swainer G., Stark D. (Eds.). *Development of spacecraft systems*. 8th ed. Addison Alpina Publisher, 2015. 765 p.
2. Mosov S.P. *Aerokosmicheskaya razvedka v sovremennykh voyennykh konfliktakh* [Aerospace intelligence in modern military conflicts: Monograph]. Kiev: Rumb, 2008. 248 p. (In Russian)
3. Ostapenko O.N., Baushev S.V., Morozov I.V. *Informatsionno-kosmicheskoye obespecheniye gruppировок voysk (sil) VS RF* [Information and space support of groups of troops (forces) of the Armed Forces of the Russian Federation]. St. Petersburg: Lubavich, 2012. 368 p. (In Russian)
4. *Opytno-tekhnologicheskyy malyy kosmicheskyy apparat "AIST-2D"* [Experimental technological small spacecraft "AIST-2D"]. Samara: SamSC of RAS Publ., 2017. 324 p. (In Russian)
5. *Kosmicheskyy kompleks operativnogo monitoringa tekhnologicheskikh i prirodnykh chrezvychaynykh situatsiy «Kanopus-V» s kosmich-*



- eskim apparatom «Kanopus-V» № 1* [Space complex of operational monitoring of technological and natural emergencies "Kanopus-V" with the spacecraft "Kanopus-V" No. 1]. Moscow: SPE VNIIEM Publ., 2011. 110 p. (In Russian)
6. Barinov K.N., Burdaev M.N., Mamon P.A. *Dinamika i printsipy postroyeniya orbital'nykh sistem kosmicheskikh apparatov* [Dynamics and principles of construction of orbital systems of spacecraft]. Moscow: Mashinostroenie, 1975. 232 p. (In Russian)
7. Barinov K.N., Mamon P.A. *Teoriya poleta kosmicheskikh apparatov* [Theory of spacecraft flight]. Moscow: MO USSR Publ., 1974. 346 p. (In Russian)
8. Ermolaev V.I., Chilin Yu.N., Narkevich N.N. *Dvigatel'nyye i energeticheskiye ustanovki kosmicheskikh letatel'nykh apparatov* [Propulsion and power plants of spacecraft]. St. Petersburg: Rubin, 2003. 558 p. (In Russian)
9. Khodnenko V.P., Khromov A.V. Vernier propulsion systems for small spacecraft. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEM* [Electromechanical matters. VNIIEM studies]. 2009. Vol. 108. No. 2. Pp. 27-32. (In Russian)
10. Lesnevsky V.A., Malakhova L.I., Mikhailov M.V. Elektroreaktivnaya dvigatel'naya ustanovka kosmicheskogo apparata "Kanopus-V" i yeye ognevyye ispytaniya [Electrojet propulsion system of the «Kanopus-V» spacecraft and its fire tests]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2011. Vol. 319. No. 4. Pp. 144-147. (In Russian)
11. Sinyavsky V.V., Tyutyukin A.E., Urtmintsev I.A., Mosin D.A., Levandovich A.V. *Dvigatel'nyye ustanovki kosmicheskikh letatel'nykh apparatov: v 2 ch. Ch. 2.: Elektroraketnyye dvigateli i dvigatel'nyye ustanovki na ikh osnove* [Propulsion systems of spacecraft: at 2 pm. Part 2. Electric rocket engines and propulsion systems based on them]. St. Petersburg: VKA named after A.F. Mozhaisky Publ., 2015. 131 p. (In Russian)
12. Gorshkov O.A., Muravlev V.A., Shagaida A.A. *Khollovskiy i ionnyye plazmennyye dvigateli dlya kosmicheskikh apparatov* [Hall and ion plasma engines for spacecraft]. Moscow: Mashinostroenie, 2008. 280 p. (In Russian)
13. Yermoshkin Yu.M. Electric propulsion's rational application range on the applied spacecrafts. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M.F. Reshetneva* [Bulletin of the Siberian State Aerospace University named after Academician MF Reshetnev]. 2011. No. 2(35). Pp. 109-113. (In Russian)
14. Gusev Yu.G., Pilnikov A.V. The Electric Propulsion Role and Place within the Russian Space Program. *Trudy MAI* [Proceedings of the MAI]. 2012. No. 60. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35385> (date of access 05.02.2018). (In Russian)
15. *Statsionarnyye plazmennyye dvigateli* [Stationary plasma thrusters]. URL: <http://www.fakel-russia.com> (date of access 05.02.2018). (In Russian)
16. *Zhidkostnyye raketnyye dvigateli maloy tyagi ot 0,5 do 250 kgs* [Liquid thruster rocket engines from 0.5 to 250 kgf]. URL: <http://www.kbhmisaeva.ru> (date of access 05.02.2018). (In Russian)
17. Boyazitov S. Yu., Vastryukov V.F., Deev V.E., Katasonov N.M., Mikhailov M.V., Podoplelov I.A. Sistema elektropitaniya korrektruyushchey dvigatel'noy ustanovki malogo kosmicheskogo apparata [Power supply system for a corrective propulsion system of a small spacecraft]. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University*. 2010. Vol. 316. No. 4. Pp. 97-101. (In Russian)

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Abdurahimov A.A., PhD, Docent, Head of the Department of spacecraft and means of interorbital transportation of the Military Space Academy;

Levandovich A.V., PhD, Senior lecturer at the Department of spacecraft and means of interorbital transportation of the Military Space Academy;

Mosin D.A., PhD, Docent, Doctoral Candidate of the Military Space Academy;

Severenko A.V., Postgraduate student at the Department of spacecraft and means of interorbital transportation of the Military Space Academy.

For citation: Abdurahimov A.A., Levandovich A.V., Mosin D.A., Severenko A.V. Technique for substantiating the parameters of orbit and characteristics of the motor installation of a small space apparatus for remote sensing of the Earth. *H&ES Research*. 2019. Vol. 11. No. 2. Pp. 12-23. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10255 (In Russian)



doi: 10.24411/2409-5419-2018-10256

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ НОВОГО КЛАССА ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ СИСТЕМ СВЯЗИ С РАЗДЕЛЕНИЕМ КАНАЛОВ ПО ФОРМЕ

ПАВЛИКОВ**Сергей Николаевич¹****УБАНКИН****Евгений Иванович²****АННОТАЦИЯ**

Объектом исследования широкополосных сигналов в системах радиосвязи. Предмет – исследование математические модели нового класса широкополосных сигналов и канала системы связи. В работе проанализированы проблемы применения в системах связи с подвижными объектами сигналов с большой базой. В развитии инфокоммуникационных технологий и систем особое значение приобретает проблема помехоустойчивости и обеспечение многостанционного доступа для скоростных мобильных абонентов связи, например, в системах радиосвязи с беспилотными летательными и космическими аппаратами, спутниками, для информационного обеспечения пассажиров самолетов и других систем, где применение широкополосных сигналов обеспечивает высокую помехоустойчивость, помехозащищенность и позволяет увеличить количество одновременно работающих абонентов в условиях повышенного уровня помех. Однако с ростом базы сигнала возрастает доплеровская дисперсия, приводящая к деформации спектра сигналов. Цель работы состоит в построении математических основ применения нового класса широкополосных сигналов в нестационарном канале с повышенной эффективностью разделения каналов по форме. В работе приведены математические основы построения нового класса широкополосных сигналов для систем связи с разделением каналов по форме, путем согласованного выбора параметров сигнала на передающей и приемной сторонах, позволяющих осуществлять их оптимальную обработку, найдены технические решения, позволяющие решить проблему разделения каналов мобильных абонентов на высоких скоростях и нелинейной динамики движения носителей средств связи.

Экспериментальные исследования сигнала, канала и метода обработки показали диапазон условий устойчивой работоспособности технологии для средств связи на скоростях относительного перемещения абонентов до 10^8 м/сек и при уровне 0,6 отношения сигнал/помеха. Определен параметр, оказывающий наибольший вклад в процесс разделения информационных каналов. Уточнен диапазон его изменения.

Основной вывод: Математические модели мультипликативного сигнала, канала и процесса согласованной корреляционной обработки показывает новую совокупность параметров разделения каналов (линий связи), что позволяет расширить сигнальное пространство алфавита передаваемых информационных компонентов за счет сочетаний параметров, известных входящим в информационную связь абонентам.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: широкополосные, сложные сигналы; помехоустойчивость; доплеровская дисперсия; преобразование Меллина; корреляционная квадратурная обработка.

Сведения об авторах:

¹к.т.н., профессор, профессор кафедры радиоэлектроники и радиосвязи Морского государственного университета имени адмирала Г.И. Невельского, г. Владивосток, Россия, psn1953@mail.ru

²к.т.н., доцент, доцент кафедры радиоэлектроники и радиосвязи Морского государственного университета имени адмирала Г.И. Невельского, г. Владивосток, Россия, uei@inbox.ru

Для цитирования: Павликов С.Н., Убанкин Е.И. Математические основы построения нового класса широкополосных сигналов для систем связи с разделением каналов по форме // Научные исследования в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 2. С. 24-31. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10256



Сравнение и выбор вариантов построения систем связи, а также сравнение реальных и потенциальных возможностей существующих систем связи обычно осуществляется по критериям, учитывающим всю совокупность существенных внешних параметров систем.

Универсального критерия оценки качества систем связи не существует, так как он был бы громоздок вследствие необходимости включения в него всех внешних параметров и учета всех возможных ограничивающих факторов. Поэтому выбор критерия производится исходя из требований охвата этим критерием только наиболее важных внешних параметров системы и существующих ограничений.

Если значения наиболее существенных параметров системы не укладываются в заданные ограничения, то соответствующие варианты отбрасываются.

Основное преимущество систем с разделением каналов по форме сигналов (РКФ) — независимая связь между абонентами в пространственно-частотно-временных координатах, что упрощает организацию и обеспечивает оперативность связи, т.к. достигается изменением структуры канальных сигналов.

Эффективность многоканальных телекоммуникационных комплексов многостанционного доступа с РКФ во многом определяется выбором ансамбля канальных радиосигналов. Правильный выбор алфавита канальных сигналов позволяет повысить качество связи, помехоустойчивость и пропускную способность.

При построении систем с многостанционным доступом возможно использование канальных сигналов, сформированных по функциям (полиномам) Лежандра, Бесселя, Гегенбауэра, Лагерра, Радемахера, Чебышева, Хаара, Уолша, Эрмита, Якоби [1], но их применение возможно при существенных ограничениях.

Полиномы Лагерра и Эрмита ортогональны на бесконечном интервале, при конечном периоде передачи сообщений их ортогональность нарушается, как следствие возникают межканальные помехи. По функциям Гегенбауэра, Якоби, Чебышева и Лежандра могут быть сформированы алфавиты ортогональных последовательностей в ограниченных пределах, но техническая реализация в этом случае значительно усложняется.

Ортогональные последовательности Уолша, Хаара, Радемахера применяются ограниченно, так как объем их ансамбля ограничен, а их ортогональность наблюдается лишь в точке, и при рассогласованиях по частотно-временным параметрам имеют место большие боковые выбросы [2].

В существующих системах разделения каналов по форме применяются импульсы с внутриимпульсной фазовой кодовой модуляцией [3], причем модулирующая кодовая комбинация каждого канального сигнала задается индивидуально, разделение сигналов при приеме выполняется в корреляторах или согласованных фильтрах [4–6].

Таким образом, в системах связи применяется разновидность (частный случай) разделения каналов по форме — кодового разделения каналов (КРК) или многостанционный доступ с кодовым разделением каналов (МДКР), Code Division Multiple Access (CDMA).

Кодовое разделение каналов (КРК) имеет ограничения, его реализация возможна только в цифровых системах с фазовой манипуляцией (ФМ).

Информация в системах с кодовым разделением каналов передается алфавитом сигналов $S_i(t)$, где i — номер абонента, $i = \overline{1, K}$, K — число абонентов связи. Элементы алфавита для различных абонентов должны быть попарно ортогональны в интервале длительности символов T :

$$\int_0^T S_i(t) \cdot S_j(t) dt = 0, \quad i \neq j, \quad i, j = \overline{1, K}. \quad (1)$$

Канальные сигналы используемые в системах связи с КРК имеют широкую полосу и, как следствие большую базу:

$$B = FT = F / F_{\text{кооб}} \gg 1,$$

где F — ширина спектра сигналов, $F_{\text{кооб}}$ — ширина спектра сообщения.

Чем больше база применяемых сигналов, тем объемнее ансамбль канальных сигналов, различающихся между собой по форме (по структуре).

При выборе канальных сигналов (кодов) систем с многостанционным доступом необходимо учитывать не только сложность их формирования, но и степень их преобразований в канале и их устойчивость к воздействию помех [3].

Выбор ансамбля сигналов в значительной степени производится по результатам анализа их автокорреляционных и взаимно корреляционных свойства.

Сигналы могут характеризоваться не только временной, но и частотной корреляционной функцией [3–4], которые в частотно-временной плоскости образуют поверхность называемую функцией неопределенности (ФН) [4–5].

Частотные корреляционные функции особо актуальны при радиосвязи с высокоскоростными объектами, например, для спутниковых телекоммуникационных систем.

Развитие телекоммуникационных систем неразрывно связано с разработкой и внедрением сложных сигналов с широкой полосой спектра, что в совокупности с оптимальными алгоритмами обработки повышает их помехоустойчивость (отношение сигнал/помеха (ОСП) на выходе) и гибкость обеспечения различных требований.

Многоканальная связь с РКФ строится как по принципу централизации работы всех каналов (ЦС), так и по автономному принципу работы всех каналов («каждый с каждым»).

При организации централизованной работы необходима синхронизация, и система называется синхронной адресной, при организации автономной многоканальности — частотно-временная синхронизация не требуется, и как следствие, системы называются асинхронными адресными системами связи (ААСС).

В ЦС системах возможно обеспечение высококачественной работы большого количества абонентов, но с ростом их числа требуется повышение мощности передатчиков, плюс к этому необходима синхронизация работы, всё это ведёт к усложнению организации связи и системы в целом.

В ААСС обеспечивается одновременная работа всех абонентов в пространственно-частотно-временных координатах, но обеспечить высококачественную связь значительно сложнее, чем в ЦС, так как сигналы принимаются одновременно и имеют случайные временные сдвиги, что приводит к нарушению их ортогональности и появлению дополнительных внутрисистемных помех. Кроме этого, для существующих сигналов невозможно обеспечить достаточный объём ансамбля канальных сигналов, ортогональных при любых сдвигах, а с ростом количества абонентов увеличиваются внутрисистемные помехи, что является основным недостатком асинхронных систем связи.

Одним из направлений развития является применение методов обработки основанных на принципе инвариантности сигнала к доплеровскому преобразованию носителя (несущей).

Такими являются, например, сигналы с гиперболической частотной модуляцией (ГЧМ-сигналы) и сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ-сигналы) в узкополосном случае. Достоинством сигналов с аналоговой модуляцией является простота технической реализации генераторов, но известные и применяемые в настоящее время сигналы имеют малый объём ансамбля, в силу того, что их параметры могут варьироваться только по скорости девиации частоты, и поэтому их применение ограничено.

При применении сигналов с большими базами в значительной степени сказывается влияние на них эффекта Доплера приводящего к декорреляции их вследствие доплеровской дисперсии и представление доплеровского преобразования сигналов только смещением по частоте не является справедливым [7], следовательно, их параметры не могут оцениваться на основании ФН Вудворда. Для широкополосных сигналов наличие относительной радиальной скорости между объектами приводящее к декорреляции обусловлено, главным образом, изменением амплитуды и растяжением сигнала, что существенно ухудшает характеристики систем связи, а отклик согласованного фильтра может иметь недостаточную для устойчивой работы системы величину [8–9].

Самый распространенный способ многостанционно-го доступа из реализованных на практике в современных системах связи разработан фирмой Qualcomm (США) [10].

Это способ КРК построенный на основе прямого расширения спектра частот с использованием функций Уолша, обеспечивающих взаимную ортогональность канальных последовательностей и отсутствие взаимных помех между каналами передачи.

Этот способ так же не лишен недостатков, а именно:

- ортогональные последовательности не обеспечивают достаточный объём ансамбля канальных сигналов;
- ортогональность таких последовательностей соблюдается точно, только в момент компенсации задержек по временной и частотной осям поверхности ФН, иначе возникают дополнительные боковые выбросы соизмеримые основному;
- необходимость синхронизации усложняет систему;
- происходит существенная декорреляция передаваемых сигналов вследствие доплеровской дисперсии.

Для устранения перечисленных недостатков предлагается передавать сигналы, сформированные по закону $s(\ln(t - \tau)) \cdot (t - \tau)^{-\gamma}$, где t — текущее время, $\tau = \text{const}$, параметр определяющий объём ансамбля ортогональных сигналов, при этом каждый символ a_i алфавита кодируют индивидуальным, отличным от других, временным сдвигом τ_i начала отсчета аргумента несущего колебания:

$$S(t) = \text{rect}\left(\frac{t - \tau_i}{T}\right) \frac{\sin(\Omega \ln(t - \tau_i))}{(t - \tau_i)^{1/\gamma}}, \quad (2)$$

где Ω — начальная частота ($\omega(t) = \Omega/(t - \tau_i)$);
 T — аддитивная длительность сигнала;
 $\gamma = \text{const}$ ($0 < \gamma \leq 1$).

Временная диаграмма излучаемого $f1_i$ сигнала (2) при $\gamma = 1$ и его амплитудного спектра $|c1_j|$ представлена на рис. 1.

Принимаемый (в точке приема) сигнал подвергнутый доплеровской деформации в канале может быть представлен в виде [9–10]:

$$S_{\Pi}(t) = \sqrt{\alpha} \left\{ \text{rect}\left(\frac{t - \tau_i}{T}\right) \frac{\sin\left[\Omega \ln\left(\alpha(t - (\tau' - \tau_{\alpha}) - \tau_i)\right)\right]}{(t - \tau_i)^{1/\gamma}} \right\},$$

где τ' — задержка распространения электромагнитных волн от передатчика к приемнику;

$\alpha = 1 \pm V/C$ — доплеровский параметр;

V — относительная радиальная скорость между объектами связи;

C — скорость распространения электромагнитных волн в канале;

$\tau_{\alpha} = \frac{1 - \alpha}{\alpha} \approx \frac{V}{C}$ — сдвиг отклика под воздействием доплеровского эффекта [11–12].

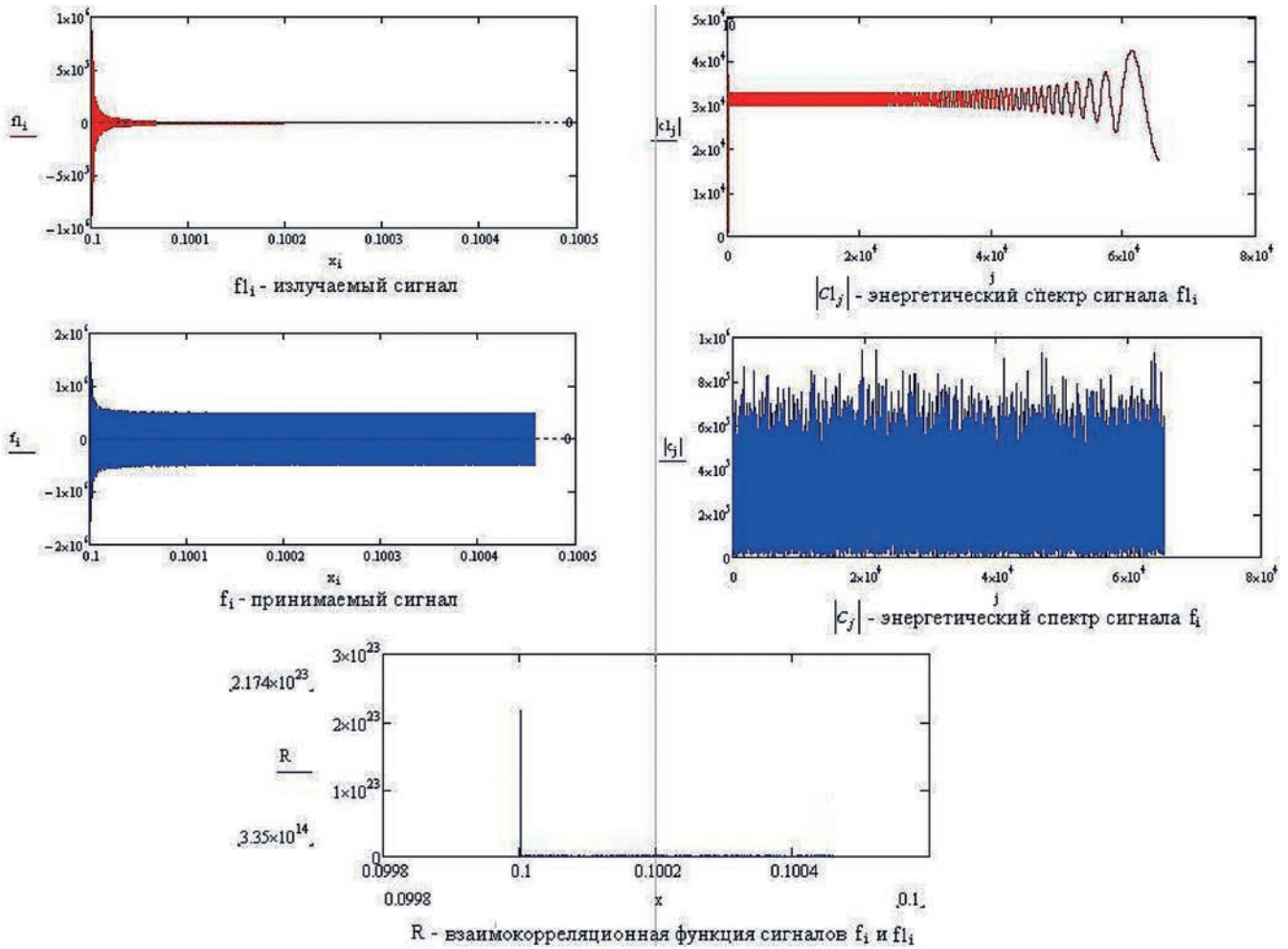


Рис. 1. Корреляционный отклик системы при $\tau = 0,1$; $\omega = 900 \cdot 10^6$; $\Omega = 10^3$; $V = 10^8$ м/сек; ОСП = 0,6

После тригонометрических и логарифмических преобразований принятый сигнал примет вид:

$$S_{\Pi}(t) = \sqrt{\alpha} \left\{ \text{rect} \left(\frac{t - \tau_i}{T} \right) \frac{\sin(\Omega \ln \alpha) \cos(\Omega \ln(t - (\tau' - \tau_\alpha) - \tau_i))}{(t - \tau_i)^{1/\gamma}} + \right. \\ \left. + \text{rect} \left(\frac{t - \tau_i}{T} \right) \frac{\cos(\Omega \ln \alpha) \sin(\Omega \ln(t - (\tau' - \tau_\alpha) - \tau_i))}{(t - \tau_i)^{1/\gamma}} \right\}, \quad (3)$$

Временная диаграмма принимаемого сигнала f_i , представляющего сумму аддитивного шума (отношение сигнал/шум равно 0,6) и сигнала (3) представлена на рис. 1, $|c_j|$ — его амплитудный спектр.

Ортогональный к (2) косинусный эталон запишется:

$$S_c(t) = \text{rect} \left(\frac{t - \tau_i}{T} \right) \frac{\cos(\Omega \ln(t - \tau_i))}{(t - \tau_i)^{1/\gamma}}. \quad (4)$$

Результат взаимно корреляционной обработки принятого сигнала (3) с эталоном (2) (корреляционный отклик) равен:

$$R_s(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t)S(t)dt = \sqrt{\alpha} \times \left\{ \sin(\Omega \ln \alpha) \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect} \left(\frac{t - \tau_i}{T} \right) \times \right. \\ \times \frac{\cos(\Omega \ln(-(t - (\tau' + \tau_\alpha) - \tau_i)))}{(t - \tau_i)^{1/\gamma}} \cdot \frac{\sin(\Omega \ln(t - \tau_i))}{(t - \tau_i)^{1/\gamma}} dt + \\ \left. + \cos(\Omega \ln \alpha) \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect} \left(\frac{t - \tau_i}{T} \right) \times \right. \\ \left. \times \frac{\sin(\Omega \ln(t - (\tau' - \tau_\alpha) - \tau_i))}{(t - \tau_i)^{1/\gamma}} \cdot \frac{\sin(\Omega \ln(t - \tau_i))}{(t - \tau_i)^{1/\gamma}} dt \right\}. \quad (5)$$

Первое слагаемое выражения (5) ничтожно т.к. сигналы под знаком интеграла ортогональны (при условии большого число периодов волн под огибающей сигнала, $\frac{\Omega}{2\pi} \ln \frac{t}{t} \gg 1$). Вырезающие функции в (5) можно заме-

нить пределами интегрирования, соответствующими началу и концу излучаемого сигнала ($t_n = \tau_i - T/2$; $t_k = T/2 + \tau_i$). Таким образом, выражение (5) переписывается:

$$R_s(\tau) = \cos(\Omega \ln \alpha) \left\{ \int_{t'}^t \frac{\sin(\Omega \ln(t - (\tau' - \tau_\alpha) - \tau_i))}{(t - \tau_i)^{1/\gamma}} \cdot \frac{\sin(\Omega \ln(t - \tau_i))}{(t - \tau_i)^{1/\gamma}} dt \right\}$$

В момент компенсации задержек $\tau' - \tau_\alpha = 0$, выражение можно представить в виде корреляционной функции Меллина с параметром сжатия равным единице, а заменой переменных $U = \ln(t - \tau_i)$, преобразовать в аддитивную:

$$R_s(\tau) = \cos(\Omega \ln \alpha) \left\{ \int_{\ln(t_n - \tau_i)}^{\ln(t_k - \tau_i)} (\sin(\Omega t))^2 dt \right\}$$

или:

$$R_s(\tau) = \cos(\Omega \ln \alpha) \left\{ \begin{array}{l} E \\ \text{при } \tau' - \tau_\alpha = 0 \end{array} \right\}. \quad (6)$$

Соответственно в результате взаимной корреляционной обработки принятого сигнала (3) с эталоном (4), корреляционный отклик в момент $\tau' - \tau_\alpha = 0$ составит:

$$R_c(\tau) = \sin(\Omega \ln \alpha) \left\{ \begin{array}{l} E \\ \text{при } \tau' - \tau_\alpha = 0 \end{array} \right\}. \quad (7)$$

Возведя в квадрат (6) и (7) и просуммировав результаты получим:

$$R = R_s^2(\tau) + R_c^2(\tau) = \left\{ \begin{array}{l} E \\ \text{при } \tau' - \tau_\alpha = 0 \end{array} \right\}^2.$$

В предложенном алгоритме квадратурной обработки входного сигнала с парой ортогональных эталонов с заданными параметрами и различными временными сдвигами τ_i начала отсчетов аргумента несущего колебания соответствующими передаваемому символу a_i , получаем при наличии доплеровских искажений устойчивый корреляционный отклик R , имеющий контрастный к боковым лепесткам максимум [13–14] (см. рис. 1).

Таким образом, сигнал (2) целесообразно использовать в условиях воздействия доплеровской деформации, кодирование осуществлять изменением от символа к символу сдвига его начала относительно начала отсчета при согласовании алфавита передающей и приемной сторон. Предложенная новая совокупность взаимосвязанных признаков позволяет получить системный эффект, заключаю-

щийся в расширении объема ансамбля сигналов обладающих повышенной помехоустойчивостью.

Устройство, реализующее данный способ радиосвязи [15] приведено на рис. 2 и содержит:

на передающей стороне: источник (источники) информации — 1, коммутатор — 2, преобразователь «аналог-цифра» — 3, формирователь сдвигов начала мультипликативного сигнала относительно начала его (импульса) отсчета — 4, блок памяти с алфавитом сигналов — 5, управляемый генератор-передатчик мультипликативных сигналов — 6, первый блок согласования с линией связи (антенна) — 7,

на приемной стороне: второй блок согласования с линией связи — 9, приемник — 10, многоканальный коррелятор — 11, матрицу цифрового преобразования — 12, потребителя информации — 13; блок питания передающей стороны — 14; блок питания приемной стороны — 15.

Предложенное устройство работает следующем образом. Аналоговая информация поступает на входы коммутатора — 2, и далее подается на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) — 3. Информация с выходов АЦП в виде пятиразрядных двоичных символов ("0" и "1") подается на входы формирователя сдвигов начала мультипликативного сигнала относительно начала его отсчета — 4. С выхода формирователя — 4 одно из значений сдвига начала мультипликативного сигнала относительно начала его отсчета ($\tau_1 \div \tau_n$), поступает на вход блока памяти — 5 определяя выбор сигнала соответствующего элементу алфавита. Выходной сигнал блока памяти поступает на управляемый генератора мультипликативных сигналов — 6 с заданными параметрами, который излучается в радиоканал через первый блок согласования с линией связи — 7.

На приемной стороне принятый сигнал со второго блока согласования с линией связи (антенны) — 9 поступает на вход приемника — 10 и далее на вход многоканального коррелятора — 11, на второй вход которого подаются сигналы алфавита a_i с блока памяти — 5.

На второй разъем многоканального коррелятора подаются опорные сигналы (сигналы алфавита a_i) с блока 5 памяти с алфавитом a_i , представляющие алфавит a_i ЧМ сигналов заданной формы и параметрами Ω , отличающиеся разными τ_i сдвигами начала мультипликативного сигнала относительно отсчета посылки.

Выходы многоканального коррелятора соединены с входами матрицы цифрового преобразования — 12, преобразующей номера выхода многоканального коррелятора, соответствующего сдвигу начала мультипликативного сигнала относительно начала его отсчета ($\tau_1 \div \tau_n$), в пятиразрядный двоичный код (в виде "0" и "1") на выходах матрицы. Этот код совпадает с комбинацией, поданной на информационные входы формирователя сдвигов начала мультипликативного сигнала относительно начала его отсчета — 4 передающей

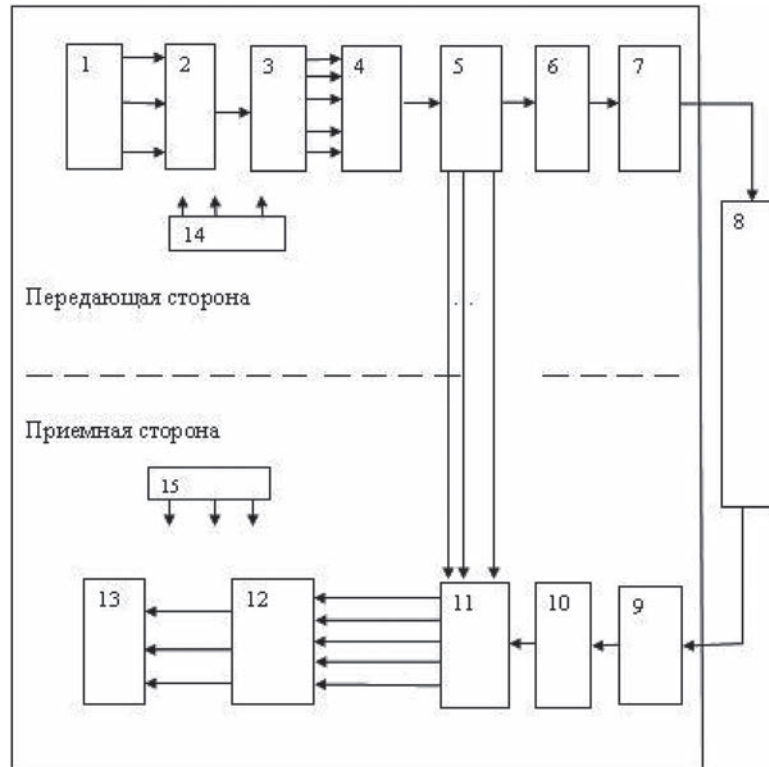


Рис. 2. Система радиосвязи

стороны. Сигналы с выходов матрицы цифрового преобразования передаются потребителю информации — 13. Введенные на приемной и передающей сторонах устройства элементы обеспечивают функционирование и требуемые параметры в условиях доплеровской деформации сигнала.

Таким образом, предлагаемая система радиосвязи может быть реализована с различной степенью помехоустойчивости, обеспечивая возможность замены ресурса канала пилот сигнала для повышения пропускной способности передачи информации, т.к. канал синхронизации и пилот сигнала не требуются.

Кроме того, предлагаемая система обеспечивает получение системного эффекта, заключающегося в следующем:

1. Замена сигналов, подверженных доплеровской дисперсии на мультипликативные сигналы инвариантные к доплеровской деформации с аналоговой модуляцией.
2. Математическая модель мультипликативного сигнала показывает новую совокупность параметров разделения каналов позволяющую расширить сигнальное пространство алфавита передаваемых информационных компонентов за счет сочетаний параметров: τ , ω и Ω известных входящим в информационную связь абонентам.
3. Предложенный сигнал обеспечивает достижение системного эффекта в условиях значительного снижения уровня излучения, или при сохранении уровня излучения

снижение требований к помехосигнальной обстановке в канале, за счёт увеличения его базы и при нарушении условия накладываемого дисперсионным соотношением.

4. Применение сигналов с большой базой обеспечит повышение отклика согласованного фильтра и рост помехоустойчивости, помехозащищенности, пропускной способности и снижение вероятности ошибки приема.

5. Предложенные сигналы с аналоговой модуляцией позволяют выполнять матричный принцип обработки (вход-выход, без промежуточных преобразований), что значительно упрощает конструктивную реализацию.

Литература

1. Кашин Б.С., Саакян А.А. Ортогональные ряды: Изд. 2-е. М.: АЦФ, 1999. 560 с.
2. Залманзон Л.А. Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях. М.: Наука, 1989. 496 с.
3. Варакин Л.Е. Теория систем сигналов. М.: Советское радио, 1970. 376 с.
4. Тузов Г.И. Статистическая теория приема сложных сигналов. М.: Советское радио, 1977. 400 с.
5. Шумоподобные сигналы в системах передачи информации / Под ред В.Б. Пестрякова. М.: Советское радио, 1973. 424 с.

6. *Пенин П. И.* Системы передачи цифровой информации. М.: Советское радио, 1976. 368 с.
7. *Зарайский В. А., Тюрин А. М.* Теория гидролокации. Л.: ВМА, 1975. 605 с.
8. *Ремли В. Р.* Влияние доплеровской дисперсии на обнаружение и разрешающую способность при использовании согласованных фильтров // ТИИЭиР. 1966. Т. 54. № 1. С. 39–46.
9. *Кук Ч., Бернфельд М.* Радиолокационные сигналы: пер. с англ. М.: Сов. Радио, 1971. 568 с.
10. *Громаков Ю. А.* Стандарты и системы подвижной радиосвязи. М.: Эко-Трендз КО, 1996. 240 с.
11. *Рихачек А. В.* Сигналы, допустимые с точки зрения доплеровского эффекта // ТИИЭиР. 1966. Т. 54. № 6. С. 39–41.
12. Патент РФ 2293997. Способ корреляционной обработки сигналов, отраженных от быстродействующих целей / *Сапрыкин В. А., Яковлев А. И., Сапрыкин А. В., Бескин Д. А.* Заявл. 13.09.2005. Опубл. 20.02.2007. Бюл. № 5. 17 с.
13. *Павликов С. Н., Убанкин Е. И.* Перспективные методы обработки широкополосных сигналов Актуальные вопросы развития высокоэффективных технологий. Одесса: КУПРИЕНКО С. В., 2014. 133 с.
14. *Павликов С. Н., Убанкин Е. И.* Метод совместного измерения дальности и относительной радиальной скорости цели за один цикл «Излучение — прием» // Т-сomm: Телекоммуникации и транспорт. 2014. Т. 8. № 4. С. 18–21.
15. Заявка на изобретение 2018143476 Российская Федерация, МПК H04B 7/00, 7/02. Способ передачи информации с помощью широкополосных сигналов / *Павликов С. Н., Убанкин Е. И.* Заявл. 07.12.2018. 11 с.

MATHEMATICAL BASICS OF BUILDING A NEW CLASS OF BROADBAND SIGNALS FOR COMMUNICATION SYSTEMS WITH SPLIT CHANNELS FORM

SERGEJ N. PAVLIKOV,

Vladivostok, Russia, psn1953@mail.ru

EVGENIY I. UBANKIN

Vladivostok, Russia, uei@inbox.ru

KEYWORDS: broadband, complex signals; noise immunity; Doppler dispersion; Mellin transform; correlation quadrature processing.

ABSTRACT

The object of study of broadband signals in radio communication systems. Subject: study of the mathematical models of a new class of broadband signals and channel communication system. In the analyzed problems of application in communication systems with mobile objects with large base. In the development of information and communication technologies and systems, particular importance attaches to the problem of noise and providing multiple access for high-speed mobile communication subscribers, for example, in radio communication systems with unmanned aircraft and spacecraft, satellites, to inform passengers of aircraft and other systems where the use of broadband signals provides high noise immunity, immunity and helps to increase the number of concurrent Subscribers in high noise level. However, with increasing signal base increases Doppler dispersion, resulting in deformation of spectrum signals. The aim of this work consists in the application of the new foundations mathematical class broadband sig-

nals in unsteady channel with high efficiency separation channels. In the work the mathematical basis for the development of a new class of broadband signals for communication systems with channel separation by form, by an agreed signal options on the transmitting and receiving parties, enabling them optimal treatment, found technical solutions to solve the problem of separation of channels mobile subscribers at high speeds and nonlinear dynamics of motion media communications. Experimental study of signal channel and method of treatment showed a range of health conditions of sustainable technologies for communications at speeds relative move subscribers up to 108 m/s and at 0.6-level signal/noise. The parameter is defined, providing the greatest contribution to the process of separating information channels. Refined range changes. The main conclusion: the mathematical models of multiple signal channel and harmonized process correlation processing shows a new set of parameters of the separation of chan-



nels (communication lines) that allows you to extend the signal space alphabet passed information components due to parameter combinations, known within the informational link subscribers.

REFERENCES

1. Kashin B.S., Sahakyan A.A. *Ortogonal'nye ryady* [Orthogonal rows]. Ed. 2nd. M.: АЦФ, 1999. 560 c. (In Russian)
2. Zalmanzon L.A. *Preobrazovaniya Fur'e, Uolsha, Khaara i ikh primeneniye v upravlenii, svyazi i drugikh oblastiakh* [Fourier, Walsh, Haar and their application to management, communications and other fields]. Moscow: Nauka, 1989. 496 p. (In Russian)
3. Vapakin L.E. *Teoriya sistem signalov* [Systems theory signals]. Moscow: Sovetskoe radio, 1970. 376 p. (In Russian)
4. Tuzov G.I. *Statisticheskaya teoriya priema slozhnykh signalov* [Statistical theory of reception of complex signals]. Moscow: Sovetskoe radio, 1977. 400 p. (In Russian)
5. Pestryakov V.B. (Ed.). *Shumopodobnye signaly v sistemakh peredachi informatsii* [Pseudonoise signals information transmission systems]. Moscow: Sovetskoe radio, 1973. 424 p. (In Russian)
6. Penin P.I. *Sistemy peredachi tsifrovoy informatsii* [Digital transmission System]. Moscow: Sovetskoe radio, 1976. 368 p. (In Russian)
7. Zarayskiy B.A., Tyurin A.M. *Teoriya gidrolokatsii* [Sonar theory]. Leningrad: BMA, 1975. 605 p. (In Russian)
8. Remli V.R. Vliyaniye doplerovskoy dispersii na obnaruzheniye i razreshayushchuyu sposobnost' pri ispol'zovanii soglasovannykh fil'trov Doppler effect dispersion on detection and resolution when using agreed filters]. *Trudy instituta inzhenerov po jelectrotekhnike i radiojelectronike* [Proceedings of the Institute of electrical and radio electronics engineers]. 1966. Vol. 54. No. 1. Pp. 39-46. (In Russian)
9. Cook Ch.E, Bernfeld M. *Radar signals*. New York, London: Academic press, 1967. 531 p.
10. Gromakov U.A. *Standarty i sistemy podvizhnoy radiosvyazi* [Standards and mobile radio communication system]. Moscow: Eko-

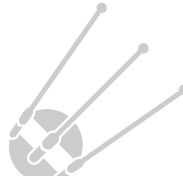
Tpendz KO, 1996. 240 p. (In Russian)

11. Rikhachek A.V. *Signaly, dopustimye s tochki zreniya doplerovskogo jeffekta* [Signals that are valid in terms of the Doppler effect]. *Trudy instituta inzhenerov po jelectrotekhnike i radiojelectronike* [Proceedings of the Institute of electrical and radio electronics engineers]. 1966. Vol. 54. No. 6. Pp. 39-41. (In Russian)
12. Patent PF 2293997. *Sposob korrelyatsionnoj obrabotki signalov, otrazhennykh ot bystrodejstvuyushchikh tselej* [Correlation processing method of signals reflected from high-speed targets]. Saprykin VA., Yakovlev O.I., Saprykin AV., Beskin D.A. Declared 13.09.2005. Published 20.02.2007. Bulletin No. 5. 17 p. (In Russian)
13. Pavlikov S.N., Ubankin E.I. *Perspektivnye metody obrabotki shirokopolosnykh signalov Aktual'nye voprosy razvitiya vysokojeffektivnykh tekhnologij* [Advanced methods of processing bandwidth signals topical questions of development of highly efficient technologies]. Odessa: KUPRIENKO S.V., 2014. 133 p. (ISBN-978-966-2769-35-7). (In Russian)
14. Pavlikov S.N., Ubankin E.I. Method of incorporated measurement of a distance and relative radial speed of the purpose for an one cycle "Radiating reception". *T-comm*. 2014. Vol. 8. No. 4. Pp. 18-21. (In Russian)
15. Application for invention No. 2018143476 RF. *Sposob peredachi informatsii s pomoshch'yu shirokopolosnykh signalov* [How to pass information through broadband signals]. Pavlikov S.N., Ubankin E.I. Declared 07.12.2018. 11 p. (In Russian)

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Pavlikov S.N., PhD, Full Professor, Professor of the Department of Radioelectronics and telecommunications of Maritime State University named after Admiral G.i. Nevelskoy;
Ubankin E.I., PhD, Docent, Associate Professor of the Department of Radioelectronics and telecommunications of the Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy.

For citation: Pavlikov S.N., Ubankin E.I. Mathematical basics of building a new class of broadband signals for communication systems with split channels form . *H&ES Research*. 2019. Vol. 11. No. 2. Pp. 24-31. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10256 (In Russian)





doi: 10.24411/2409-5419-2018-10257

МОДЕЛИ СОСТОЯНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ СТОХАСТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ИМИ

БУРЕНИН

Андрей Николаевич¹

ЛЕГКОВ

Константин Евгеньевич²

АННОТАЦИЯ

Сложность современных инфокоммуникационных сетей и невозможность их точного описания приводят к невозможности использования классических вариационных методов, лежащих в основе детерминированной теории оптимального управления. Это приводит и к необходимости применения стохастической теории управления, в которой инфокоммуникационные сети рассматриваются как системы, описываемые разностными или дифференциальными уравнениями с учетом действующих воздействий или помех. При этом одним из основных положений стохастической теории управления инфокоммуникационными сетями является теория фильтрации на основе теории Калмана-Бьюси. В исследовании рассматриваются вопросы получения оценок состояния современных инфокоммуникационных сетей при организации управления ими на основе процедур и стратегий стохастического управления динамическими объектами. Инфокоммуникационные сети рассматриваются как объекты управления. Предложено инфокоммуникационную сеть представить трехуровневой мультисетевой моделью, каждый уровень которой задается вполне определенной совокупностью сетей услуг. Сети услуг предоставляют фиксированные услуги конкретного уровня: инфраструктурного, промежуточного и базового. Каждая уровневая сервисная сеть задается моделью соответствующего графа, а все компоненты модели инфокоммуникационной сети задаются случайными функциями и случайными процессами. Это позволяет решать задачу управления ею процедурами, рассмотренными в стохастической теории управления. При этом прогноз дается в виде выходной переменной динамической системы, а управление осуществляется по наблюдениям. Для определения коэффициентов динамической системы, представляющей инфокоммуникационную сеть, требуется решить уравнение Риккати с заданными начальными условиями, которое аналогично уравнению управления линейными детерминированными системами с квадратичным критерием. Для решения задач оптимальной фильтрации и детерминированного управления предложено использовать соответствующие алгоритмы, основанные на теореме разделения, позволяющей строить оптимальную стратегию, составленную из двух частей: оптимального фильтра, вычисляющего оценки состояния инфокоммуникационной сети в виде условного среднего при наблюдаемых выходных данных, и обратной связи (от оцениваемого состояния к управлению).

Сведения об авторах:

¹д.т.н., доцент, главный специалист акционерного общества «Научно-исследовательский институт «Рубин», г. Санкт-Петербург, Россия, konferencia_asu_vka@mail.ru

²к.т.н., доцент, начальник кафедры автоматизированных систем управления Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия, constl@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: система; инфокоммуникационная сеть; детерминированное управление; стохастическое управление; модель состояния.

Для цитирования: Буренин А.Н., Легков К.Е. Модели состояния современных инфокоммуникационных сетей при организации стохастического управления ими // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 2. С. 32-39. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10257



Введение

В современных условиях резко возрастает потребность различных структур общества в получении не только телекоммуникационных, но и информационных услуг. Для удовлетворения этих потребностей в последние годы создаются и развертываются различные инфокоммуникационные системы и сети [1].

Этот процесс предполагает решение достаточно сложных технических и теоретических задач, в которых были бы получены предложения и рекомендации по организации таких сетей, функционирующих в условиях широкого спектра возмущений, приводящих к тому, что сам процесс их функционирования носит в значительной степени неопределенный стохастический характер, что накладывает дополнительные трудности и приводит к появлению трудно разрешимых задач, которые необходимо разрешить.

Анализ основных тенденций развития разнообразных информационных систем и систем коммуникаций, как развитых зарубежных стран мира, так и отечественных, показывает [1], что в основе построения ядра современных систем, учитывающих процессы конвергенции информационных систем и телекоммуникационных составляющих многих сложных систем, является создание и развертывание инфокоммуникационных сетей.

Решение ряда задач по созданию и развертыванию современных инфокоммуникационных сетей, преследует цели с одной стороны получения максимального эффекта при эксплуатации метасистем, пользующихся их услугами, в различных внешних условиях работы при ограниченном ресурсе, а, с другой — в предоставлении возможности нормативной эксплуатации метасистем и их технического обслуживания с минимальными затратами.

Успешно решить требуемые задачи можно, основываясь на применении стандартных решений, современных телекоммуникационных, информационных технологий и протоколов, технологий и протоколов управления, а также моделей управления, которые фактически будут являться моделями обеспечения функционирования инфокоммуникационных сетей с необходимым уровнем качественных показателей. Среди таких моделей существенный интерес представляют модели так называемого стохастического управления.

При решении задач данного класса специалисты по управлению столкнулись с некоторыми подзадачами, для решения которых требовались очень точные характеристики инфокоммуникационных сетей. При этом сами инфокоммуникационные сети оказались очень сложными. Все это привело к невозможности использования классических вариационных методов, лежащих в основе детерминированной теории оптимального управления и к тому, что проблемы устойчивости управления становятся не столь важными, т. к. очень часто реальная система управ-

ления инфокоммуникационной сетью устойчива при довольно общих условиях [2, 3]. Кроме того в детерминированной теории оптимального управления не введено различие между программным управлением, характерным для разомкнутой системы, и управлением с обратной связью, а сама обратная связь представляет собой просто некоторую функцию переменных управления. В этом плане разомкнутая система и замкнутая система (с обратной связью) эквивалентны в том смысле, что функция потерь для них имеет одно и то же значение, не смотря на то, что характеристики устойчивости у них различны: система программного управления всегда устойчива, в то время как система с обратной связью лишь асимптотически устойчива.

Другим недостатком детерминированной теории управления является тот, что воздействия или помехи описываются в ней априорно известной функцией, т. е. по сути рассматриваются нереальные модели возмущений.

В отличие от детерминированной, стохастическая теория управления рассматривает инфокоммуникационные сети, описываемые разностными или дифференциальными уравнениями с учетом действующих воздействий или помех, которые рассматриваются как случайные процессы, и позволяет получить ответы на следующие вопросы:

- каковы стохастические свойства параметров инфокоммуникационной сети?
- как при заданных сети критериях найти такой закон управления ею, который минимизирует один или несколько критериев?

При этом одним из основных положений стохастической теории управления инфокоммуникационными сетями является теория фильтрации, разработанная Винером и Колмогоровым, в которой необходимо решать интегральные управления Винера-Хопфа, что часто достаточно сложно осуществить. Поэтому в последнее время для решения этих задач применяют теорию Калмана-Бьюси [3–4].

Инфокоммуникационные сети как объекты стохастического управления

Основной задачей инфокоммуникационной сети является предоставление пользователям разнообразных информационных и телекоммуникационных услуг требуемого качества. В монографии [1] в качестве базовой логической модели предложена многоуровневая функциональная архитектура. При этом предложено инфокоммуникационную сеть представить трехуровневой мультисетевой моделью, каждый уровень которой задается вполне определенной совокупностью сетей услуг, предоставляющих фиксированные услуги конкретного уровня: инфраструктурного, промежуточного и базового. При таком подходе каждая уровневая сеть услуг может быть описана графами $G_{IL}(Y_A, H_b)$, $G_{MWL}(J_A, E_b)$, $G_{BL}(Z_A, T_b)$, представля-

ющих собой модель соответственно сетей услуг инфраструктурного, промежуточного и базового уровней.

Выделенные уровневые инфраструктурные, промежуточные, базовые сети услуг целесообразно рассмотреть как определенные архитектурные компоненты: инфраструктурный (ИК), промежуточный (ПК), базовый (БК), которые фактически определяют функционирование всей инфокоммуникационной сети в условиях различных случайных возмущений, характеризуя такое важное ее свойство как устойчивость.

Для каждого уровня модели инфокоммуникационной сети, интенсивность требований на получение услуг, представляющих собой вероятностный процесс, является суммой интенсивностей частных требований на определенную (i, j, k) услугу, т.е.:

$$\begin{aligned} \Lambda_{IL} &= \sum \lambda_{IL}(i); \\ \Lambda_{MWL} &= \sum \lambda_{MWL}(j); \\ \Lambda_{BL} &= \sum \lambda_{BL}(k). \end{aligned} \quad (1)$$

Значение интенсивности выходного потока обслуженных требований (т.е. требований, которым был предоставлен соответствующий сервис) составит соответственно для инфраструктурного, промежуточного и базового уровней:

$$\begin{aligned} B_{IL} &= \Theta_{IL}(\Lambda_{IL}); \\ B_{MWL} &= \Theta_{MWL}(\Lambda_{MWL}); \\ B_{BL} &= \Theta_{BL}(\Lambda_{BL}), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\Theta_{IL}, \Theta_{MWL}, \Theta_{BL}$ — векторные функции, которые нужно определить, задающие модель соответственно инфраструктурного, промежуточного, базового компонента инфокоммуникационной сети, учитывающую возмущения.

Математическую модель инфокоммуникационной сети можно представить следующим образом (рис. 1), представляя все компоненты модели инфокоммуникационной сети случайными функциями и случайными процессами, можно решать задачу управления ею процедурами, рассмотренными в стохастической теории управления. При этом прогноз дается в виде выходной переменной динамической системы, а управление осуществляется по наблюдениям, а для того, чтобы определить коэффициенты

этой динамической системы, требуется решить уравнение Риккати [3–4] с заданными начальными условиями. Само по себе уравнение Риккати аналогично уравнению управления линейными детерминированными системами с квадратичным критерием, поэтому для решения задач оптимальной фильтрации и детерминированного управления можно использовать схожие алгоритмы.

Для таких систем, как рассматриваемые инфокоммуникационные сети, с квадратичным критерием, решение получается на основе теоремы разделения, которая позволяет строить оптимальную стратегию, составленную из двух частей (рис. 2): оптимального фильтра, вычисляющего оценки состояния инфокоммуникационной сети в виде условного среднего при наблюдаемых выходных данных (2), и обратной связи (от оцениваемого состояния к управлению).

В этом случае оказывается, что обратная связь получается такой же, как при отсутствии возмущений и точного измерения состояния сети и может быть найдена путем решения задачи детерминированного управления, а условное среднее значение состояния сети характеризует выходную переменную фильтра Калмана, который в значительной степени задает модель сети, когда управление осуществляется по наблюдениям, и который обладает характеристиками, зависящими от возмущений и динамических свойств инфокоммуникационной сети и независимыми от критериев.

Таким образом, оптимальная стратегия решения задачи стохастического управления инфокоммуникационными сетями с квадратичным критерием состоит из динамической системы с зависящими от времени параметрами, получаемыми при решении уравнения Риккати с заданными начальными условиями. Часто решение удается осуществить на основе численных алгоритмов.

Стохастические модели компонентов инфокоммуникационной сети

В качестве моделей компонентов инфокоммуникационной сети часто используют стационарные случайные процессы $\{b(t), t \in T\}$, для которых [5–7] распределение $\{b(t_1), b(t_2), \dots, b(t_n)\}$ тождественно равно распределению $\{b(t_1+\tau), b(t_2+\tau), \dots, b(t_n+\tau)\}$ для всех τ , для которых справедливо:

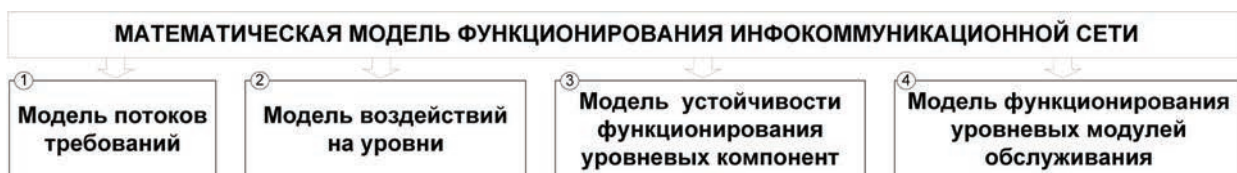


Рис. 1. Математическая модель функционирования инфокоммуникационной сети

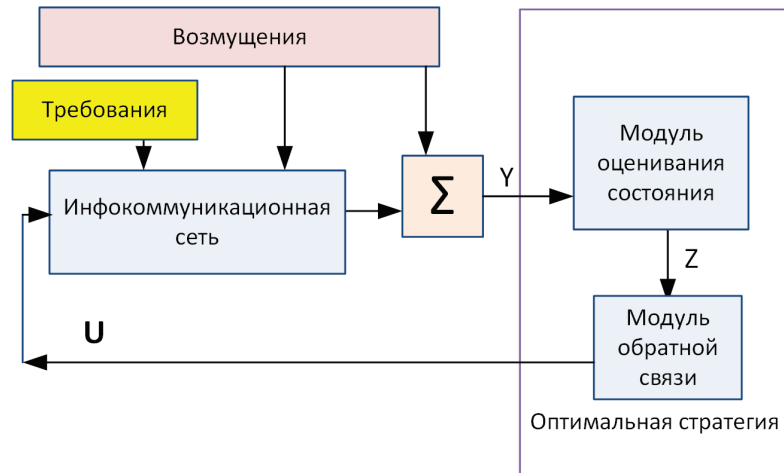


Рис. 2. Управление инфокоммуникационной сетью на основе применения теоремы разделения

$$M\{b(t)\} = \int_{\Omega} b(t, \omega) P(d\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^{+T} b(t, \omega) dt. \quad (3)$$

Среди процессов, задающих компоненты инфокоммуникационной сети, представляющих собой близкую к равновесной композиции случайных элементов, выделяют нормальные или гауссовы процессы [5–7], для которых совместное распределение $\{b(t_1), b(t_2), \dots, b(t_n)\}$ является нормальным для каждого k и которые определяются средним значением $m_b = M\{b(t_i)\}$, ковариациями $k_{ij} = \text{cov}\{b(t_i), b(t_j)\} = M\{[b(t_i) - m_b][b(t_j) - m_b]^T\}$ и плотностью распределения:

$$f(\xi) = (2\pi)^{-k/2} (\det K)^{-1/2} \exp[-1/2 (\xi - m_b)^T K^{-1} (\xi - m_b)], \quad (4)$$

где:

$$m_b = \begin{bmatrix} m_{b1} \\ m_{b2} \\ \dots \\ m_{bk} \end{bmatrix}, \quad K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{1k} & \dots & \dots & k_{kk} \end{bmatrix}.$$

Некоторые компоненты инфокоммуникационной сети, поведение которых характеризуется низким уровнем последствия, лучше описываются моделью марковского процесса $\{b(t), t \in T\}$, для которого характерно [5–7], что для любых элементов множества $T = \{t_1 < t_2 < t_h\}$, условная вероятность $P\{b(t) \leq b(t_1), b(t_2), b(t_h)\} = P\{b(t) \leq b(t_h)\}$, а функция распределения определяется соотношением

$$P(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_h, t_1, t_2, \dots, t_h) = \int_0^{\xi_1} \int_0^{\xi_2} \dots \int_0^{\xi_{h-1}} F(\xi_h, t_h | \gamma_{h-1}, t_{h-1} \times dF \int \gamma_{h-1}, t_{h-1} | \gamma_{h-2}, t_{h-2} \dots dF(\gamma_1, t_1). \quad (5)$$

Функционирование других компонентов более точно можно задать моделью процесса второго порядка [5–6], для которого $M\{b^2(t)\} < \infty$, а среднее значение и ковариационная функция равны соответственно $m_b(t) = M\{b(t)\}$ и $k(\vartheta, t) = M[b(\vartheta) - m_b(\vartheta)][b(t) - m_b(t)]^T$.

В качестве моделей компонент инфокоммуникационной сети с существенным динамическим трендом целесообразно использовать случайные процессы с независимыми приращениями $\{b(t), t \in T\}$, для которых [6–7] случайные величины $b(t_h) - b(t_{h-1}), b(t_{h-1}) - b(t_{h-2}), \dots, b(t_2) - b(t_1), b(t_1)$ являются взаимно независимыми величинами, а при условии их некоррелированности, процесс будет процессом с ортогональными приращениями, для которого

$$\text{cov}\{b(t), b(t)\} - \text{cov}\{b(\vartheta), x(\vartheta)\} = F(t) - F(\vartheta); \text{cov}\{db, db\} = dF(t), \quad (6)$$

где $dF(t)$ — ковариация приращений процесса $\{b(t), t \in T\}$.

Ковариационная функция для процесса с ортогональными приращениями характеризуется следующими свойствами:

$$\begin{aligned} k(\vartheta, t) &= \text{cov}\{b(t), b(t)\} = \text{cov}\{b(t) - b(\vartheta) - b(t), b(t)\}; \\ k(\vartheta, t) &= \text{cov}\{b(t), b(t)\} + \text{cov}\{b(\vartheta) - b(t), b(t)\}; \\ k(\vartheta, t) &= \text{cov}\{b(t), b(t)\}; \\ k(\vartheta, t) &= \text{cov}\{b[\min(\vartheta, t)], b[\min(\vartheta, t)]\}. \end{aligned} \quad (7)$$

В целом в качестве моделей состояния инфокоммуникационной сети при стохастическом управлении ею уже нельзя использовать системы дифференциальных (разностных) уравнений первого порядка, как в детерминированном случае, а целесообразно рассматривать стохастические раз-

ностные и дифференциальные уравнения, которые определяют марковский характер протекающих процессов.

Представляет интерес рассмотрение процессов стохастического управления в дискретные моменты времени, которое позволяет достаточно просто получить стохастическую модель состояния инфокоммуникационной сети простым добавлением значений возмущений и требований к правому члену каждого дифференциального (разностного) уравнения в системе.

Рассматривая любое состояние инфокоммуникационной сети, следует отметить, что для траектории ее движения в будущем несущественно, каким образом было достигнуто данное состояние. Ясно, что нельзя требовать, чтобы движение инфокоммуникационной сети как стохастической системы в будущем однозначно определялось ее состоянием в настоящем, поэтому стохастическая модель состояния может быть задана следующим образом:

$$\mathbf{s}(t+1) = h[\mathbf{s}(t), t] + \bar{v}[\mathbf{s}(t), t], \quad t \in T, \quad (8)$$

где $h[\dots]$ — условное среднее;

$\mathbf{s}(t)$ — n -мерный вектор состояния инфокоммуникационной сети;

\bar{v} — многомерная случайная величина с нулевым средним.

При этом условное вероятностное распределение $\mathbf{s}(t+1)$ при зафиксированном $\mathbf{s}(t)$ не зависит от того как инфокоммуникационная сеть пришла в состояние $\mathbf{s}(t)$. Отсюда следует, что условное распределение $\bar{v}(t)$ также не зависит от предыстории. Модель (8) будет стохастическим разностным уравнением, описывающим состояние инфокоммуникационной сети.

Для многих инфокоммуникационных сетей условное распределение $\bar{v}(t)$ при зафиксированном $\mathbf{s}(t)$ нормально. Тогда $\bar{v}(t)$ целесообразно нормировать таким образом, чтобы $\frac{\bar{v}(t)}{\sigma(\mathbf{s}(t), t)}$ было распределено нормально с параметрами (0, 1), а $\sigma(\mathbf{s}(t), t)$ является дисперсией $\mathbf{s}(t)$. Тогда уравнение, описывающее состояние инфокоммуникационной сети можно представить следующим образом:

$$\mathbf{s}(t+1) = h[\mathbf{s}(t), t] + \bar{\sigma}(\mathbf{s}(t), t) \bar{\zeta}(t), \quad t \in T, \quad (8)$$

где $\bar{\zeta}(t)$ — гауссов случайный вектор с нулевым средним значением.

Уравнение (8), задающее состояние, можно представить в следующем виде:

$$\mathbf{s}(t+1) = B(t+1; t) \mathbf{s}(t) + \bar{\zeta}(t), \quad t \in T, \quad (9)$$

где $\mathbf{s}(t)$ — n -мерный вектор состояния;

$\bar{\zeta}(t)$, $t \in T$ — последовательность n -мерных нормальных независимых случайных векторов;

B — $n \times n$ матрица с изменяющимися во времени элементами.

Векторы $\mathbf{s}(t)$ и $\bar{\zeta}(t)$ независимы, а $\bar{\zeta}(t)$ определяется моментами первого и второго порядка

$$M \bar{\zeta}(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad M \bar{\zeta}(t) \bar{\zeta}^T(t) = K_1(t) = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{n1} & k_{n2} & \dots & k_{nn} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

При этом начальное состояние инфокоммуникационной сети можно характеризовать математическим ожиданием $m_s(0)$ и ковариационной матрицей $R_s(0)$.

Стохастический процесс $\mathbf{s}(t)$, $t \in T$ описывающий состояние инфокоммуникационной сети, можно полностью характеризовать математическим ожиданием и ковариационной функцией.

Для определения среднего значения процесса $\mathbf{s}(t)$, $t \in T$ применим операцию математического ожидания к обеим частям уравнения (9)

$$\begin{aligned} m_s(t+1) &= M[\mathbf{s}(t+1)] = M[B(t+1; t) \mathbf{s}(t) + \bar{\zeta}(t)] = \\ &= B(t+1; t) m_s, \end{aligned} \quad (11)$$

$$m_s(t_0) = M \mathbf{s}(t_0) = m_s(0).$$

Тогда среднее значение стохастического процесса, описывающего состояние инфокоммуникационной сети является решением разностного уравнения (11) при начальном условии $m_s(0)$.

Для поиска значения ковариационной функции будем считать $m_s(t_0) = 0$, что само по себе не ограничивает общности рассуждений, т.к. всегда допустимо ввести переменную $\mathbf{s}'(t) = M \mathbf{s}(t) - m_s(t)$. Для $\vartheta \geq t$ имеем:

$$\begin{aligned} \mathbf{s}(\vartheta) &= B(\vartheta, t) \mathbf{s}(t) + B(\vartheta, t+1) \bar{\zeta}(t) + \dots + \\ &+ B(\vartheta, t-1) \bar{\zeta}(t-1) + \bar{\zeta}(\vartheta-1), \end{aligned} \quad (12)$$

где $B(\vartheta, t) = B(\vartheta, \vartheta-1) B(\vartheta-1, \vartheta-2), \dots, B(t+1, t)$.

Из (12) следует, что

$$\begin{aligned} M[\mathbf{s}(\vartheta), \mathbf{s}^T(\vartheta)] &= M\{[B(\vartheta, t) \mathbf{s}(t) + \\ &+ B(\vartheta, t+1) \bar{\zeta}(t) + \dots + \bar{\zeta}(\vartheta-1)] \mathbf{s}^T(\vartheta)\}. \end{aligned} \quad (13)$$

Поскольку среднее значение $\bar{\zeta}(\vartheta)$ равно нулю, а $\mathbf{s}(t)$ не зависит от $\bar{\zeta}(\vartheta)$ при $\vartheta \geq t$, то все слагаемые правой части (13), кроме первого, также равны нулю, поэтому

$$K(\vartheta, t) = B(\vartheta, t) K(t, t) = B(\vartheta, t) K(t), \quad \vartheta > t, \quad (14)$$

В выражении (14) искомая ковариационная функция процесса, описывающего состояние инфокоммуникационной сети, есть решение следующего разностного уравнения:

$$K(t+1) = B(t+1, t) K(t) B^T(t+1, t) + K_1(t), \quad (15)$$

где начальное условие составит $K(t_0) = M[s(t_0)] s^T(t_0) = K_0$.

Для инфокоммуникационных сетей, функционирующих в относительно стабильных случайных средах, решением уравнения является нормальный процесс $s(t)$ со средним значением $m_s(t+1) = B(t+1, t) m_s(t)$, начальным условием $m_s(t_0) = m_s(0)$ и ковариационной функцией $K(\vartheta, t) = B(\vartheta, t) K(t)$, $\vartheta \leq t$, при этом $K(t)$ удовлетворяет условию $K(t+1) = B(t+1, t) K(t) B^T(t+1, t) + K_1(t)$ и $K(t_0) = K_0$.

Для стационарных условий функционирования инфокоммуникационной сети можно считать матрицы B и K_1 постоянными, поэтому справедливо следующее соотношение:

$$K(t) = B^T K(0) [B^T]^t + \sum_{\vartheta=0}^{t-1} B^T K_1 [B^T]^\vartheta. \quad (16)$$

Как правило, для рассматриваемых инфокоммуникационных сетей собственные значения матрицы B меньше единицы, поэтому ряд (16) сходится.

Таким образом, получены результаты оценивания состояний инфокоммуникационной сети в трактовке задач стохастического управления, что позволяет применять для управления сетью все приемы и стратегии в соответствии со схемой управления, соответствующей теореме разделения (см. рис. 2).

Выводы

Анализ мировых тенденций развития разнообразных информационных систем, систем коммуникаций и протекающих процессов конвергенции информационных и телекоммуникационных технологий, показал, что в основе построения ядра современных систем является создание и развертывание инфокоммуникационных сетей, функционирование которых с высокими качественными показателями невозможно без организации оперативного управления ими на основе адекватных моделей [8–22]. Среди таких моделей существенный интерес представляют модели стохастического управления.

Сложность инфокоммуникационных сетей и невозможность их точного исчерпывающего описания приводят к невозможности использования классических вариационных методов, лежащих в основе детерминированной теории оптимального управления и к необходимости применения стохастической теории управления, в которой ин-

фокоммуникационные сети рассматриваются как системы, описываемые разностными или дифференциальными уравнениями с учетом действующих воздействий или помех. При этом одним из основных положений стохастической теории управления инфокоммуникационными сетями является теория фильтрации на основе теории Калмана-Бьюси.

Для таких систем, как рассматриваемые инфокоммуникационные сети, с квадратичным критерием, решение получается на основе теоремы разделения, которая позволяет строить оптимальную стратегию, составленную из двух частей: оптимального фильтра, вычисляющего оценки состояния инфокоммуникационной сети в виде условного среднего при наблюдаемых выходных данных, и обратной связи — от оцениваемого состояния сети к управлению ею. Оптимальная стратегия управления при этом представляет собой решение задачи стохастического управления инфокоммуникационной сетью с квадратичным критерием, получаемым при решении уравнения Риккати с заданными начальными условиями. Для решения используют широкий спектр численных алгоритмов.

Литература

1. Буренин А.Н., Легков К.Е. Современные инфокоммуникационные системы и сети специального назначения. Основы построения и управления. М.: Медиа Паблишер, 2015. 348 с.
2. Bellman R, Kalaba R. Mathematical Trends in Control Theory. Dover. New York, 1963. 273 с.
3. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1969. 289 с.
4. Беллман Р. Процессы регулирования с адаптацией: пер. с англ. М.: Наука, 1964. 327 с.
5. Prabhu N. U. Stochastic Processes. Basic Theory and its Applications. New York, 1965. 347 с.
6. Карлин С. Основы теории случайных процессов: пер. с англ. М.: Мир, 1971. 537 с.
7. Гухман И.И., Скороход А.В. Введение в теорию случайных процессов. М.: Наука, 1965. 606 с.
8. Шнепс-Шенне М.А. Системы распределения информации. Методы расчета. М.: Связь, 1979. 342 с.
9. Емельянов А.В., Легков К.Е., Оркин В.В. Анализ проблем информационной безопасности информационных систем специального назначения при управлении ими // Труды II Межвузовской научно-практической конференции «Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях». СПб.: Изд-во Военная академия связи, 2017. С. 122–126.
10. Шаньгин В. Ф. Защита информации в компьютерных системах и сетях. М.: ДМК Пресс, 2012. 592 с.
11. Ерохин С.Д., Артамонова Я. С., Легков К. Е. К вопросу о методике выявления угроз информационной без-



опасности в пограничном пространстве // I-methods. 2013. Т. 5. № 2. С. 19–22.

12. *Бабошин В.А., Сиротенко Ф.Ф.* Модель процесса мониторинга транспортной сети специального назначения на основе нечеткой логики // I-methods. 2013. Т. 5. № 1. С. 20–25.

13. *Ерохин С.Д., Легков К.Е.* Информационные угрозы автоматизированных систем управления технологическими процессами // I-methods. 2014. Т. 6. № 1. С. 24–26.

14. *Корсунский А.С., Масленникова Т.Н., Ерышов В.Г.* Модель системы анализа защищенности информации в автоматизированных системах // I-methods. 2015. Т. 7. № 4. С. 30–34.

15. *Mitra D., Ramakrishnan K. G.* Technics for traffic engineering of multiservice in priority networks // BLTJ. 2001. Vol. 1. Pp. 123–130.

16. *Зима В.М., Молдовян А.А., Молдовян Н.А.* Безопасность глобальных сетевых технологий. СПб.: Изд-во СПбУ, 1999. 234 с.

17. *Котенко И.В., Степашкин М.В., Богданов В.С.* Анализ защищенности компьютерных сетей на раз личных этапах проектирования и эксплуатации // Известия вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49. № 5. С. 3–8.

18. *Gorodetsky V., Kotenko I., Karsayev O.* The Multi-agent Technologies for Computer Network Security: Attack Simulation, Intrusion Detection and Intrusion Detection Learning // The International Journal of Computer Systems Science & Engineering. 2003. Vol. 18. No. 4. Pp. 191–200.

19. *Harmer P., Williams P., Gunsch G., Lamont G. B.* An artificial immune system architecture for computer security applications // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2002. Vol. 6. No. 3. Pp. 252–280.

20. *Al-Kasassbeh M., Adda M.* Network fault detection with Wiener filter-based agent // Journal of Network and Computer Applications. 2009. Vol. 32. No. 4. Pp. 824–833.

21. *Буренин А.Н., Легков К.Е.* Основные проблемы безопасности подсистем обеспечения единым временем элементов систем управления сложными организационно-техническими объектами // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Т. 13. № 1. С. 45–53.

22. *Буренин А.Н., Легков К.Е., Терещенко Г.В.* Управление безопасностью функционирования подсистемы обеспечения единым временем элементов системы управления сложным организационно-техническим объектом // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Т. 13. № 2. С. 36–45.

STATUS MODELS OF MODERN INFOCOMMUNICATION NETWORKS AT THE ORGANIZATION OF STOCHASTIC MANAGEMENT OF THEM

ANDREY N. BURENIN,

St. Petersburg, Russia, konferencia_asu_vka@mail.ru

KONSTANTIN E. LEGKOV,

St-Petersburg, Russia, constl@mail.ru

KEYWORDS: system; infocommunication network; the determined management; stochastic management; status model.

ABSTRACT

The complexity of modern infocommunication networks and impossibility of their exact description result in impossibility of use of the classical variation methods which are the cornerstone of the determined theory of optimum control. It results also in need of application of the stochastic theory of management in which infocommunication networks are considered as the systems described by differential or differential equations taking into account the operating influences or noises. At the same time one of basic provisions of the stochastic theory of management of infocommunication networks is the theory of filtering on the basis of the theory of Kalmana-Byyusi. In a research questions of receiving estimates of a status of modern infocommunication networks at the organization

of management by them on the basis of procedures and the strategy of stochastic management of dynamic objects are considered. Infocommunication networks are considered as control objects. It is offered to present infocommunication network a three-level multi-network model which each level is set by quite certain set of networks of services. Networks of services provide the fixed services of specific level: infrastructure, intermediate and basic. Each-level service network is set by model of the corresponding graph, and all components of model of infocommunication network are set by random functions and accidental processes. It allows to solve a problem of management of it of the procedures considered in the stochastic theory of management. At the same time the forecast is given in the



form of an output variable dynamic system, and control is exercised on observations. For determination of coefficients of the dynamic system representing infocommunication network it is required to solve Rikkati's equation with the set initial conditions which is similar to the equation of management of the linear determined systems with square criterion. For a solution of problems of optimum filtering and the determined management it is offered to use the corresponding algorithms based on the theorem of division allowing to build the optimum strategy made of two parts: the optimum filter calculating estimates of a status of infocommunication network in the form of a conditional average at the observed output data and feedback coupling (from the estimated condition to management).

REFERENCES

1. Burenin A.N., Legkov K.E. *Sovremennyye infokommunikatsionnye sistemy i seti spetsial'nogo naznacheniya. Osnovy postroyeniya i upravleniya: Monografiya* [Modern infocommunication systems and special purpose networks. Basics of creation and control]. Moscow: Media Publisher, 2015. 348 p. (In Russian)
2. Belman R, Kalaba R. *Mathematical Trends in Control Theory*. Dover. New York. 1963. 273 p.
3. Pontryagin L.S., Boltyanskij V.G., Gamkrelidze R.V., Mishchenko E.F. *Matematicheskaya teoriya optimal'nykh processov* [Mathematical theory of optimum processes]. Moscow: Science, 1969. 289 p. (In Russian)
4. Belman R. *Processy regulirovaniya s adaptaciej* [Processes of regulation with adaptation]. Moscow: Science, 1964. 327 p. (In Russian)
5. Prabhu N.U. *Stochastic Processes. Basic Theory and its Applications*. New York, 1965. 347 p.
6. Karlin S.A. *First Course in Stochastic Processes*. Academic Press, 1968. 514 p.
7. Gikhman I.I., Skorokhod A.V. *Vvedenie v teoriyu sluchajnykh processov* [Introduction to the theory of accidental processes]. Moscow: Science, 1965. 606 p. (In Russian)
8. Shnep'shnepe M.A. *Sistemy raspredeleniya informatsii. Metody rascheta* [Distribution System information. Calculation methods]. Moscow: Svyas', 1979. 342 p. (In Russian)
9. Emel'yanov A.V., Legkov K.E., Orkin V.V. Analiz problem informatsionnoy bezopasnosti informatsionnykh sistem spetsial'nogo naznacheniya pri upravlenii imi [Proceedings of the II Interuniversity scientific and practical conference "Problems of technical support of troops in modern conditions"]. *Trudy II Mezhevuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Problemy tekhnicheskogo obespecheniya voysk v sovremennykh usloviyakh"* [Proceedings of the II Interuniversity scientific and practical conference "Problems of technical support of troops in modern conditions"]. St. Petesburg: Voennaya akademiya svyazi Publ., 2017. Pp. 122-126. (In Russian)
10. Shan'gin V.F. *Zashchita informatsii v komp'yuternykh sistemakh i setyakh* [Information Protection in computer systems and networks]. Moscow: DMK Press, 2012. 592 p. (In Russian)
11. Erokhin S.D., Artamonov Y.S., Legkov K.E. To the question about the methods of identification of information security threats in the border space. *I-methods*. 2013. Vol. 5. No. 2. Pp. 19-22. (In Russian)
12. Baboshin V.A., Sirotenko F.F. The model of the process of monitoring the transportation network for special purposes based on fuzzy logic. *I-methods*. 2013. Vol. 5. No. 1. Pp. 20-25. (In Russian)
13. Erokhin S.D., Legkov K.E. Information threats are automated systems of control of technological processes. *I-methods*. 2014. Vol. 6. No. 1. Pp. 24-26. (In Russian)
14. Korsun A.S., Maslennikova T.N., Erychov V.G. Model system analysis of information security in automated systems. *I-methods*. 2015. Vol. 7. No. 4. Pp. 30-34. (In Russian)
15. Mitra D., Ramakrishnan K.G. Technics for traffic engineering of multiservice in priority networks. *BLTJ*. 2001. Vol. 1. Pp. 123-130.
16. Zima V.M., Moldovyan A.A., Moldovyan N.A. *Bezopasnost' global'nykh setevykh tekhnologij* [The global security network technologies]. St. Petesburg: SPbU Publ., 1999. 234 p. (In Russian)
17. Kotenko I.V., Stepashkin M.V., Bogdanov V.S. Vulnerability Analysis of Computer Networks on Design Stages and Maintenance. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering]. 2006. Vol. 49. No. 5. Pp. 3-8. (In Russian)
18. Gorodetsky V., Kotenko I., Karsayev O. The Multiagent Technologies for Computer Network Security: Attack Simulation, Intrusion Detection and Intrusion Detection Learning. *The International Journal of Computer Systems Science & Engineering*. 2003. Vol. 18. No. 4. Pp. 191-200.
19. Harmer P., Williams P., Gunsch G., Lamont G.B. An artificial immune system architecture for computer security applications. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2002. Vol. 6. No. 3. Pp. 252-280.
20. Al-Kasassbeh M., Adda M. Network fault detection with Wiener filter-based agent. *Journal of Network and Computer Applications*. 2009. Vol. 32. No. 4. Pp. 824-833.
21. Burenin A.N., Legkov K.E. Main problems of safety of subsystems of providing management systems with uniform time of elements with difficult organizational and technical objects. *T-Comm*. 2019. Vol. 13. No. 1. Pp. 45-53. (In Russian)
22. Burenin A.N., Legkov K.E., Terechenko G.V. Security management of functioning of a subsystem of providing management system with uniform time of elements with a difficult organizational and technical object. *T-Comm*. 2019. Vol. 13. No. 2. Pp. 36-45. (In Russian)

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Burenin A. N., PhD, Full Professor, Chief specialist of "Research Institute "Rubin";

Legkov K. E., PhD, Docent, Head of the Department of automated systems of control of the Military Space Academy.



doi: 10.24411/2409-5419-2018-10258

РАЗРАБОТКА ПОСТПРОЦЕССОРА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ НА СТАНКАХ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

ВЕРЖАКОВСКАЯ
Марина Александровна¹

АРОНОВ
Виталий Юрьевич²

СЛЕПНЕВ
Алексей Андреевич³

АННОТАЦИЯ

Данная работа заключается в разработке программного модуля для станков с силовым программным управлением, который отвечает всем требованиям по механической, фрезерной обработке тяжелых сплавов. Актуальность темы данной разработки заключается в необходимости улучшения и ускорения механической обработки деталей, путем внедрения разработанного программного модуля. Цель данной работы – разработка программного модуля для автоматизации работы на станках с числовым программным управлением для предприятия ООО «Самарский завод специальных сплавов». Объектом исследования является цех механической обработки деталей, оснащенный станками с числовым программным управлением. Предметом исследования является процесс анализа систем с числовым программным управлением и оптимальный способ реализации программного модуля (постпроцессора). В работе рассматривается процесс создания постпроцессора и управляющей программы для станков с числовым программным управлением. Постпроцессор – это модуль, преобразующий файл траектории движения инструмента и технологических команд, рассчитанный процессором CAM или CAD/CAM-системы, в файл управляющей программы в строгом соответствии с требованиями методики ручного программирования конкретного комплекса «станок – система с ЧПУ». Для разработки программного модуля для оптимизации на работы на станках с ЧПУ использовались следующие программные средства: CAD/CAM система NX Unigraphics 10 (система необходима для создания 3D модели будущей детали и создания управляющих программ для станка с числовым программным управлением), PostBuilder (генератор постпроцессоров, система необходима для создания 3D модели будущей детали и создания управляющих программ для станка с числовым программным управлением), Cimko Edit (необходима для виртуального моделирования, демонстрации готовой управляющей программы). Главной особенностью разработанного постпроцессора является то, что кадры кода управляющей программы записаны циклами. При циклической работе увеличивается скорость движения инструмента, повышается гладкость, уменьшается шероховатость обрабатываемой детали. Циклы заставляют двигаться инструмент плавно по заданному радиусу. В случае с отдельными координатами инструмент движется прерывисто, следовательно на детали остаются следы от инструмента. В заключении приводится сравнительный анализ стандартного и разработанного в данной работе модулей. Разработанный постпроцессор позволяет составлять корректные, более удобные управляющие программы. С экономической точки зрения, постпроцессор позволяет сократить затраты на инструмент и материалы благодаря гибкому алгоритму управляющей программы.

Сведения об авторах:

¹к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры программного обеспечения и управления в технических системах Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия, vma@psuti.ru

²к.т.н., доцент кафедры программного обеспечения и управления в технических системах Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия, avu@psuti.ru

³программист-технолог цеха металлообработки Самарского завода специальных сплавов, г. Самара, Россия, a.slepnev93@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: числовое программное управление; CAD/CAM-система; программный модуль; постпроцессор; управляющая программа; NX Unigraphics; 3D-модель; механическая обработка.

Для цитирования: Вержаковская М.А., Аронов В.Ю., Слепнев А.А. Разработка постпроцессора для оптимизации работы на станках с числовым программным управлением // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 2. С. 40-50. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10258



Внедрение на предприятии станков с числовым программным управлением (ЧПУ) можно отнести к самому крупному и перспективному достижению в области металлообработки. В результате внедрения станков с ЧПУ происходит повышение производительности труда, появляются возможности для многостаночного обслуживания. На станках с ЧПУ целесообразно изготавливать детали сложной формы, где требуется одновременное перемещение по нескольким координатам.

В зависимости от разработанного программного обеспечения, можно полностью автоматизировать и ускорить процесс производства, что позволит улучшить условия труда рабочих-станочников и значительно уменьшить долю тяжелого, ручного труда.

Основным преимуществом производства с помощью станков с ЧПУ по сравнению с универсальными станками с ручным управлением, следующие:

- сокращение времени обработки детали;
- повышение точности обработки;
- снижение затрат на специальные приспособления;
- возможность использования менее квалифицированной рабочей силы;
- сокращение времени на производство деталей;
- сокращение затрат на контроль и транспортирование деталей.

Основной успех в высокой производительности зависит от правильно подобранной системы с ЧПУ, CAD/CAM — системы и соответствующего всем требованиям программного модуля. Мало оснастить предприятие современным оборудованием. Очень важно, чтобы это предприятие еще и эффективно работало. Добиться этого можно максимально оптимизировав технологический процесс, а если учесть, что на современном предприятии наиболее сложные и ответственные операции производятся на оборудовании с ЧПУ, то оптимизация технологического процесса сводится к оптимизации программного кода для этих станков [1].

Для обслуживания станков с ЧПУ требуются технологи-программисты, способные с использованием компьютерных технологий разрабатывать управляющие программы для обработки самых различных по форме и размерам деталей [2–3].

При этом не всегда работу по анализу, переработке и представлению информации способен выполнять компьютер в автоматическом режиме, из-за отсутствия заранее известного алгоритма достижения поставленной задачи. В связи с этим возникает достаточно серьезная проблема, связанная с созданием оптимального технологического процесса механической обработки изделий на оборудовании с ЧПУ в автоматическом режиме [4].

Актуальность темы данной разработки заключается в необходимости улучшения и ускорения механической

обработки деталей, путем внедрения разработанного программного модуля. Цель данной работы — разработка программного модуля для автоматизации работы на станках с ЧПУ для предприятия ООО «Самарский завод специальных сплавов». Для выполнения механической обработки, на предприятии имеется 3-х координатный фрезерный станок с ЧПУ. Программный модуль необходим предприятию для качественной обработки сложных деталей, таких как: штампы, пресс-формы, сердечники.

ООО «Самарский завод специальных сплавов» является одним из немногих заводов в России, где производится механическая обработка жаропрочных сплавов с помощью станков с ЧПУ. Руководство завода стремится улучшать качество готовых деталей, не увеличивая время на механическую обработку.

Сложность механической обработки штампов заключается в высокой прочности обрабатываемого материала. Функция оптимизированной подачи автоматически выявляет сложные для обработки участки и производит движение инструмента на заниженной подаче, что позволяет обеспечить лучшую стойкость инструмента.

Объектом исследования является цех механической обработки деталей, оснащенный станками с ЧПУ.

Предметом исследования является процесс анализа систем ЧПУ и оптимальный способ реализации программного модуля (постпроцессора).

Постпроцессор — это модуль, преобразующий файл траектории движения инструмента и технологических команд, рассчитанный процессором CAM или CAD/CAM-системы, в файл управляющей программы в строгом соответствии с требованиями методики ручного программирования конкретного комплекса «станок — система с ЧПУ» [5].

Процесс создания постпроцессора условно разделяется на два основных этапа: написание постпроцессора и отладка постпроцессора на станке. Первый этап может происходить дистанционно, без выезда разработчика на предприятие, в случае предоставления всей необходимой документации на оборудование. Второй этап предусматривает обязательное присутствие разработчика непосредственно возле станка, исключение могут составлять только простые станки (до 3х одновременно управляемых координат), в этом случае отладка может так же вестись дистанционно.

Постпроцессор состоит из четырех частей (рис. 1):

1. Паспорт станка («вопросник») — это набор вопросов и возможные варианты ответов о станке и правилах программирования для него, например тип оборудования, возможность программного управления охлаждением; наличие кругового интерполятора, точность аппроксимации и др. [6].

2. Макет кадра — это структура кадра управляющей программы. При этом определяется последовательность



Рис. 1. Структура постпроцессора

вывода адресов команд в кадр УП; размерность числовой информации, следующей за каждым адресом; специальные свойства команд, определяющие условия отмены одних команд другими и необходимость обязательного вывода в кадр УП.

3. Алгоритмический наполнитель — это набор алгоритмов преобразования каждой использованной команды CLDATA в последовательность команд в формате ASCII для данного устройства ЧПУ.

4. Макрокоманды — набор укрупненных команд CLDATA, заменяющих действие нескольких отдельных команд CLDATA.

Для разработки программного модуля на персональный компьютер установлены следующие программы:

- CAD/CAM система NX Unigraphics 10. Данная система необходима для создания 3D модели будущей детали и создания управляющих программ для станка с ЧПУ;
- PostBuilder (генератор постпроцессоров). Устанавливается как дополнение к NX Unigraphics, в ней происходит процесс создания постпроцессора;
- Cimko Edit. Необходима для виртуального моделирования, демонстрации готовой управляющей программы.

Генератор постпроцессоров создает программу ЧПУ используя пять явных последовательностей: «Последовательность в начале программы», «Последовательность в начале

операции», «Траектория», «Последовательность в конце операции», «Последовательность в конце программы» (рис. 2).

Этап «Последовательность в начале программы» формирует начало управляющей программы, т.е. добавляются необходимые кадры и команды, которые будут выводиться в начале каждой управляющей программы. Система нуждается только в некоторых функциях, таких как код остановки, перемотки и конца программы, в начале и конце программы ЧПУ [7]. Также можно управлять выводом других событий в траектории от оставшихся событий траектории инструмента таких как линейная интерполяция, круговая интерполяция и т.д., используя последовательность кадров в траектории инструмента.

Этап «Последовательность в начале операции» задает параметры, которые будут выводиться в начале каждой операции, такие как рабочие оси, по которым будет происходить движение инструмента, устанавливаются режимы резания, а также определяются команды для позиционирования (рис. 3). Система первоначально генерирует и продолжает генерировать это событие, когда мы обрабатываем постпроцессором операции. Данное событие происходит, вне зависимости от наличия смены инструмента в операции.

Этап «Траектория» разделяется на 3 части:

1. Меню «Управление станком» управляет устройствами станка такими как включение СОЖ, шпинделя, подачи. Можно также использовать события управления станком для смены режима, таких как: программирование в абсолютных координатах или в приращениях, задание подачи в обратном времени, в миллиметрах в минуту, в оборотах в минуту или постоянная скорость резания.

2. Меню «Перемещение» описывает, как постпроцессор обрабатывает записи в траектории инструмента. Система генерирует несколько типов перемещений, ускоренное перемещение, линейное перемещение, круговое перемещение.

3. Меню «Встроенные циклы» позволяет сконфигурировать вывод кадров встроенных циклов сверления. Генератор постпроцессоров позволяет задать все параме-

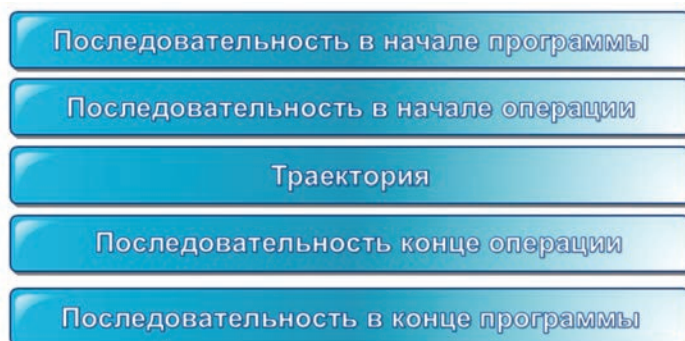


Рис. 2. Этапы разработки постпроцессора



Рис. 3. Создание кинематики станка

тры, необходимые для форматирования встроенных циклов для станка.

Этап «Последовательность в конце операции» позволяет задать, какие кадры будут выводиться в программу в конце каждой операции. Обычно это кадры типа возврата в исходное положение и выключения шпинделя или подачи СОЖ. Если нам известно, что кадры в конце операции будут всегда неизменны, то мы можем ввести их в эту последовательность вместо того, чтобы каждый раз задавать события задаваемые пользователем.

Этап «Последовательность в конце программы» позволяет задать вывод в конце каждой программы ЧПУ. Стоит заметить, что события начало программы и конец программы должны выводиться только однажды главным постпроцессором. Если перезаписывать любое из этих событий вручную, сопряженный постпроцессор восстанавливает первоначально заданные события начала программы и конца программы.

Разработанный программный модуль для CAD/CAM системы NX Unigraphics состоит из трех файлов с разным расширением: «Postprocessor.pui»; «Postprocessor.def» и «Postprocessor.tcl».

При установке NX Unigraphics уже предлагается несколько готовых, стандартных постпроцессоров. Они отличаются своей сложностью и значительно затрудняют работу оператора и самого станка с ЧПУ. Разработанный программный модуль помещается в папку с типовыми постпроцессорами. После запуска CAD/CAM системы NX Unigraphics пользователь приступает к созданию управляющей программы.

Сейчас на рынке представлено большое количество CAD/CAM систем различного уровня [8–9]. При этом важно понимать, не только то, какие задачи можно решать с помощью имеющегося средства разработки УП, а какие — нет, но и то, насколько эффективно они решаются [10–11].

В результате анализа процесса разработки УП в современных САМ-системах были выделены следующие этапы работы: настройка параметров проекта, импорт геометрических данных, задание параметров инструмента, задание параметров операций, расчет траекторий, визуализация обработки; формирование выходной документации [10, 12].

Автоматизация создания УП имеющихся станков приведет:

- к увеличению загрузки станка;
- снижению квалификации станочника-программиста, необходимой для написания управляющих программ;
- уменьшению времени на ввод управляющей программы в оперативную память станка многократно;
- расширению применения мелкосерийного штучного изготовления деталей;
- увеличению скорости переналадки станка на изготовление другого вида продукции;
- созданию архивов готовых управляющих программ;
- увеличению производительности труда станочника-программиста, за счет снижения времени на переналадку одного станка, станочник-программист сможет обслуживать большее количество станков [13].

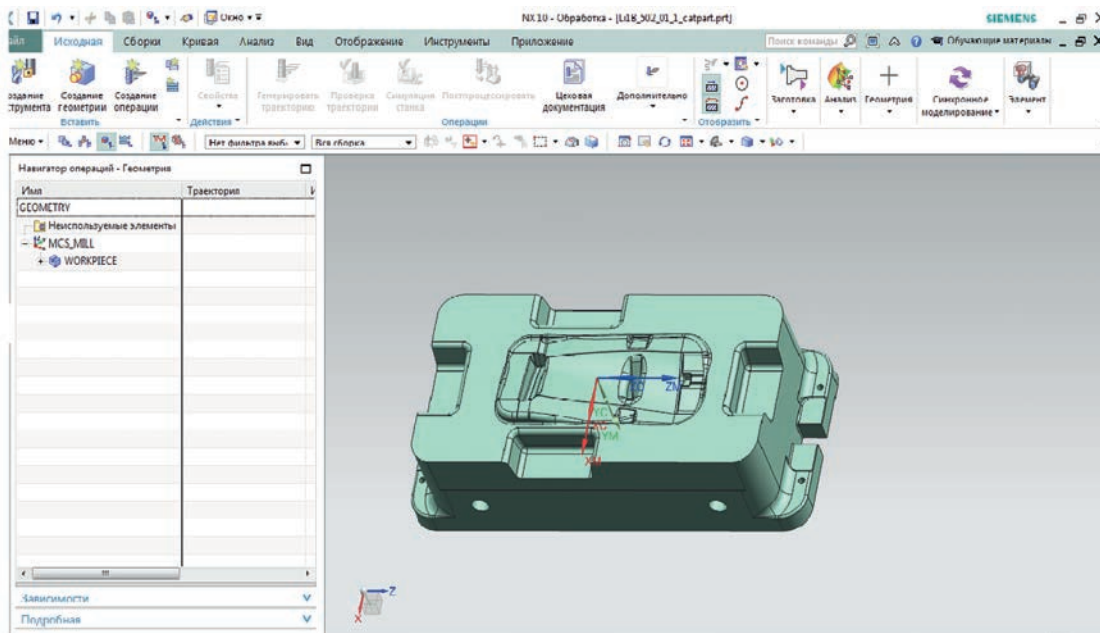


Рис. 4. Стартовое окно системы NX Unigraphics

Ниже приведем алгоритм и пример создания управляющей программы на основании разработанного постпроцессора.

Для создания управляющей программы необходимо запустить систему NX Unigraphics и открыть уже готовую 3D модель (рис. 4). Для проверки программного модуля создадим управляющую программу для данной 3D модели. Будем выполнять «черновую» и «чистовую» обработку крепежных элементов представленной детали [14].

Первым шагом необходимо открыть меню «Создание операции», в котором представлены все виды операций, которое могут использоваться для обработки различных деталей (фрезерная и токарная обработка, 3-х, 4-х, 5-х осевая обработка, «черновая», «чистовая», обработка стенок, обработка пола, сверление).

Меню, отвечающее за «черновую» обработку детали, представлено на рис. 5. Здесь необходимо выбрать область резания, в данном случае это крепежные элементы, инструмент, которым будет обрабатываться данный участок, глубину резания, шаблон резания (траектория движения инструмента) и задать «припуск» на чистовую обработку.

После ввода всех необходимых данных необходимо нажать кнопку «Генерировать траекторию». В результате система сгенерирует траекторию обработки на языке системы NX Unigraphics (рис. 6).

Данный язык не понятен станку с ЧПУ, для этого надо перевести управляющую программу с помощью разработанного программного модуля. Для этого необходимо произвести постпроцессирование, выбрать нужный про-

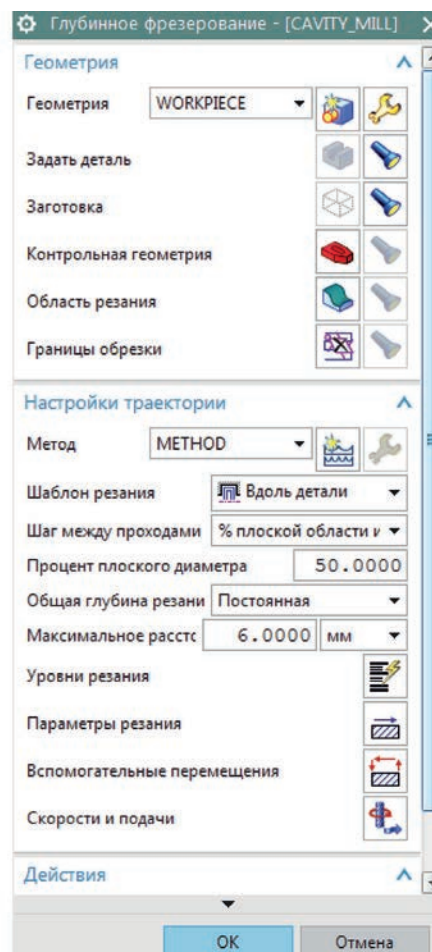


Рис. 5. Меню «CAVITY-MILL» для «черновой» обработки детали

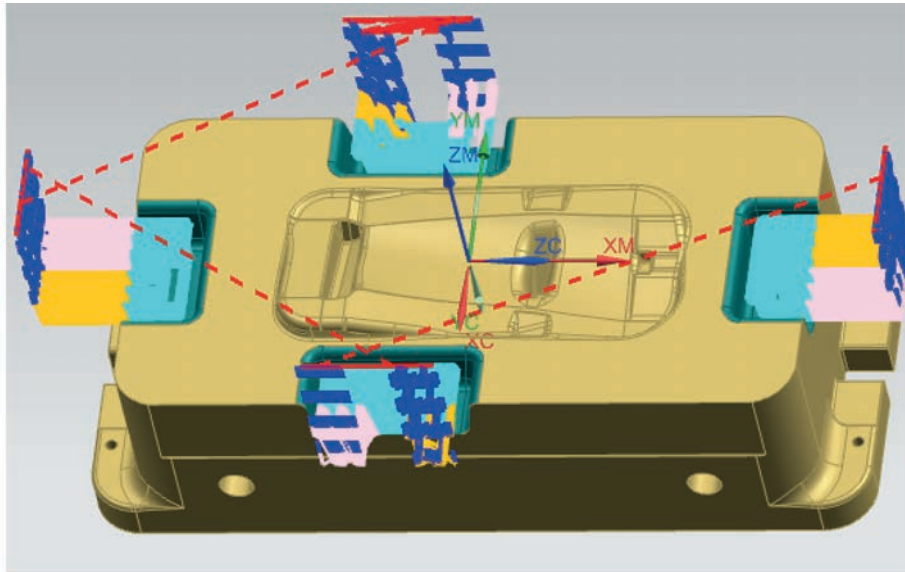


Рис. 6. Изображение траектории инструмента

граммный модуль и путь, куда будет сохранена готовая управляющая программа (рис. 7).

Готовая управляющая программа имеет понятный станку с ЧПУ язык и формат.MPF. Данный формат можно открыть с помощью блокнота (рис. 8).

Каждая строчка в управляющей программе состоит из кадров. С помощью разработанного программного модуля видно, что каждый кадр пронумерован, в «шапке» программы указана информация по инструменту, каждый кадр отвечает за определенное движение инструмента, кадр N12; N24 выполнены одной строчкой. Данные кадры указывают станку вести инструмент с помощью круговой интерполяции, что позволяет сделать траекторию более плавной. Такая возможность позволяет уменьшить количество кадров и улучшить качество готовой детали. В конце программы указано время, которое будет необходимо для выполнения этой управляющей программы.

Перед внедрением управляющей программы в станок ее необходимо проверить, провести симуляцию обработки в специальной программе Simco Edit. Данная программа позволяет с максимальной точностью спроектировать движение инструмента. Это покажет, как сгенерирована программа, если ли в ней лишние или не правильные перемещения инструмента, чистота проходов инструмента, позволит сверить время работы управляющей программы. На рис. 9 представлен интерфейс программы Simko Edit с ранее полученным готовым кодом управляющей программы (рис. 8).

Для проверки сгенерированной управляющей программы необходимо перейти во вкладку «Прорисовка»,

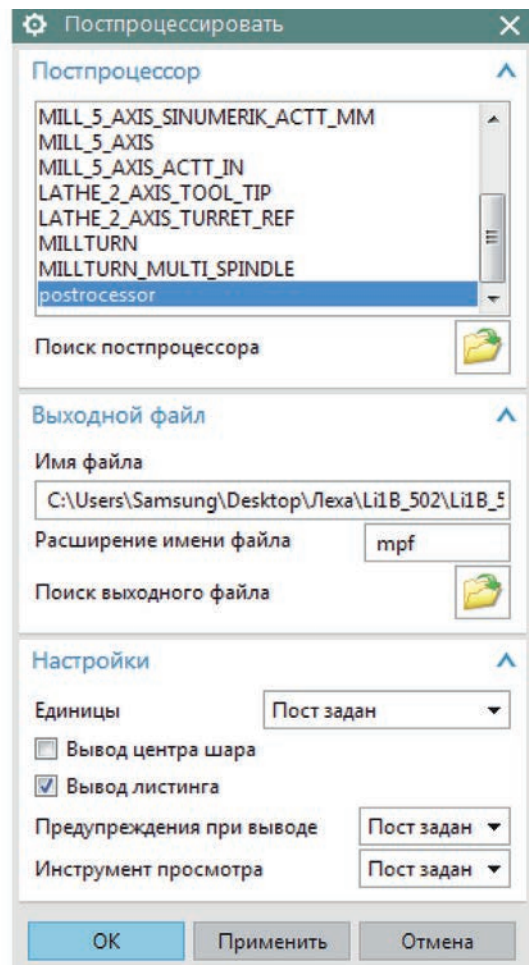


Рис. 7. Меню постпроцессирования траектории

```

3_kolonki_chem — Блокнот
Файл Правка Формат Вид Справка
N1 G54
N2 G00 Z200.
N3 X0.0 Y0.0
N4 ; (MILL_D40)
N5 T00 M06
N6 G00 X-94.019 Y200.059 S0 M03
N7 Z120.179
N8 Z2.5
N9 G01 Z-.5 F250.
N10 Y180.059
N11 Y174.463
N12 G03 X-90.028 Y170.472 I4. J.01
N13 G01 X-39.972
N14 G03 X-35.981 Y174.462 I-.01 J4.
N15 G01 Y180.059
N16 Y216.059
N17 Z19.5
N18 G00 Z120.179
N19 X-114.019 Y200.059
N20 Z2.5
N21 G01 Z-.5
N22 Y180.059
N23 Y154.463
N24 G03 X-110.028 Y150.472 I4. J.009
N25 G01 X-19.972
.....
N16547 Z-31.5
N16548 G00 Z120.179
N16549 M30
(TOTAL TIME 1349.68 MIN);
    
```

Рис. 8. Готовый код управляющей программы

нажать опцию «Прорисовка окна». В результате появится траектория управляющей программы. Для создания ее визуализации, необходимо нажать опцию 3D модель, в результате появится окно, в котором автоматически указываются крайние точки траектории инструмента, инструмент, которым будет производиться симуляция. В данном случае

управляющая программа сделана под фрезу D40R0, следовательно указываются такие же параметры фрезы. После введения всех необходимых данных на основном экране появляется смоделированная 3D визуализация траектории (рис. 10). По результатам визуализации видно, что управляющая программа выполнена правильно.

Для оценки разработанного программного модуля сравним его со стандартным постпроцессором, который, по умолчанию, предлагает система NX Unigraphics. Для этого были сгенерированы 2 одинаковые программы с помощью разных программных модулей. Для сравнения была выполнена чистовая обработка изготавливаемых деталей (крепежных элементов). На рис. 11 изображены первые кадры управляющей программы: слева программа сгенерирована стандартным программным модулем, справа разработанным в данной работе постпроцессором.

В программе, разработанной стандартным постпроцессором видно, что кадры программы нумеруются десятками. Данная особенность усложняет поиск кадра в длинной программе т.к. предельная нумерация равна 99.999 кадрам.

В новом постпроцессоре кадры нумеруются единицами, что позволяет в 10 раз увеличить числовой диапазон программы.

В исходных данных программы слева указаны исходные точки станка, но т.к. данный постпроцессор стандартный, он не учитывает особенностей конкретного станка, что может привести к ошибке в программе. В программе справа данная опция изменена на нулевые точки детали, что исключает ошибки и врезание инструмента в деталь.

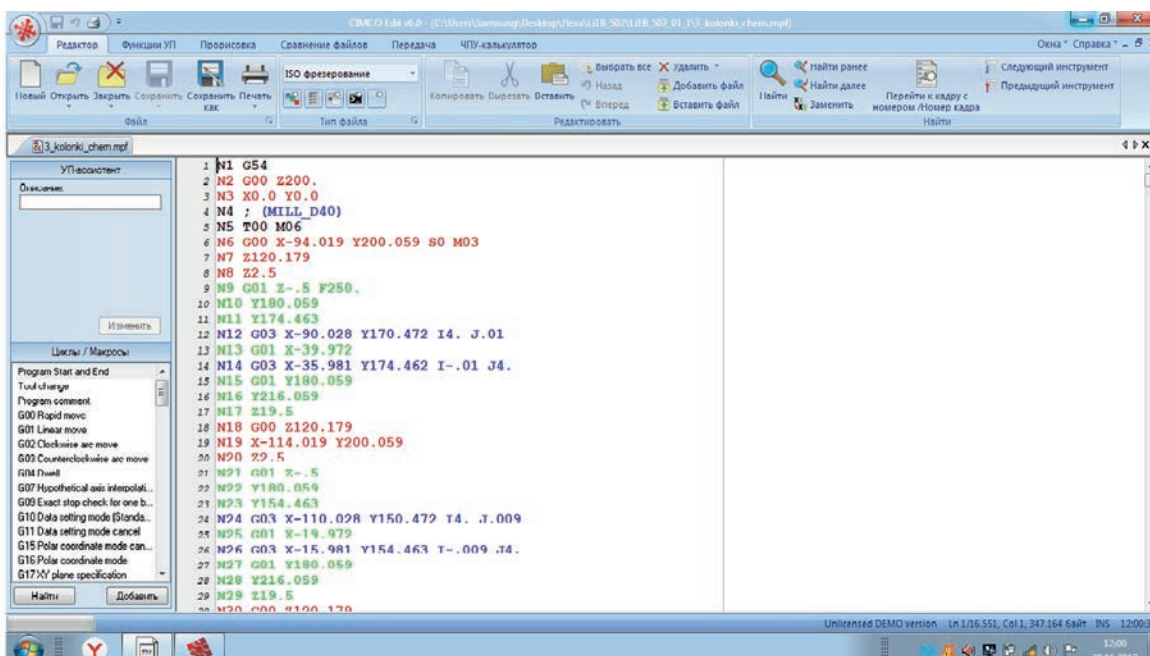


Рис. 9. Интерфейс программы Cimko Edit

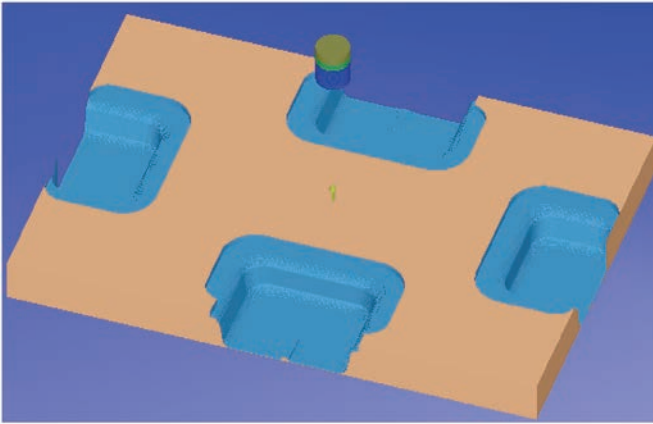


Рис. 10. Смоделированная 3D визуализация траектории

Главной особенностью разработанного постпроцессора является то, что кадры записаны циклами, например кадр № 10. В стандартном постпроцессоре данный кадр разбит на отдельные координаты (№ 500–590). При циклической работе увеличивается скорость движения инструмента, повышается гладкость, уменьшается шероховатость обрабатываемой детали. Циклы заставляют двигаться инструмент плавно по заданному радиусу. В случае с отдельными координатами инструмент движется прерывисто, следовательно на детали остаются следы от инструмента.

Сравнив два программных модуля можно сделать вывод, что разработанный в данной работе программный модуль более мобилен, гибок и удобней для рабочего оператора станка с ЧПУ. Также улучшается качество обрабатываемой детали, из-за циклической траектории по-

вышается стойкость инструмента и уменьшается время на обработку детали.

Разработанный программный модуль отличается от стандартных постпроцессоров следующим:

- постпроцессор нумерует каждый кадр управляющей программы, что облегчает оператору возможность запуска программы с определенной позиции;
- оптимизированная траектория позволяет сократить длительность программы без ущерба для обрабатываемой детали;
- встроенные циклы (при необходимости) позволяют упростить работу оператора и ускорить выполнение управляющей программы;
- исходные данные управляющей программы позволяют программисту писать определенные комментарии для оператора, такие как название управляющей программы, место обработки, информацию по инструменту;
- в конце каждой управляющей программы постпроцессор указывает время работы операции, что позволяет более точно оператору рассчитать время выполнения детали [15].

В данной работе разработан аналог стандартного программного модуля, который используется на предприятии ООО «Самарский завод специальных сплавов». В созданном постпроцессоре исправлены все недостатки своего предшественника и добавлены новые функциональные возможности при генерации управляющей программы [13]. Разработанный постпроцессор позволяет составлять корректные, удобные управляющие программы. С экономической точки зрения, постпроцессор позволяет

<pre> N330 T="MILL" N340 M6 N350 MSG("METHOD") N360 TRAF00F N370 SUPA G0 Z=_Z_HOME D0 N380 SUPA G0 X=_X_HOME Y=_Y_HOME D0 N390 ; N400 ;Initial Move N410 CYCLE832(_camtolerance,0,1) N420 TRAF00F N430 G54 N440 G0 X-124.089 Y-110.526 S0 D0 M3 N450 Z123.161 N460 ;Approach Move N470 Z20.09 N480 ;Engage Move N490 G1 Z17.09 M8 F250. N500 X-125.585 Y-109.765 N510 X-127.217 Y-109.361 N520 X-128.898 Y-109.306 N530 X-130.553 Y-109.601 N540 X-132.11 Y-110.235 N550 X-133.501 Y-111.179 N560 X-134.641 Y-112.411 N570 ;Cutting N580 X-134.831 Y-112.652 N590 X-136.081 Y-113.635 N600 X-137.508 Y-114.342 </pre>	<pre> N1 G54 N2 G00 Z200. N3 X0.0 Y0.0 N4 ; (MILL) N5 T00 M06 N6 G00 X-124.089 Y-110.526 S0 M03 N7 Z123.161 N8 Z20.09 N9 G01 Z17.09 F250. N10 G03 X-134.641 Y-112.411 I-4.232 J-6.789 N11 G02 X-134.831 Y-112.652 I-24.563 J19.05 N12 X-140.629 Y-114.873 I-5.717 J6.245 N13 G01 X-150.264 N14 G02 X-154.857 Y-112.17 I0.0 J5.254 N15 G03 X-160.296 Y-110.615 I-3.497 J-1.942 N16 G01 X-158.187 Y-120.244 N17 Z20.09 N18 G00 Z123.161 N19 X-121.708 Y-109.413 N20 Z19.305 N21 G01 Z16.305 N22 G03 X-131.817 Y-112.355 I-3.371 J-7.255 N23 G02 X-132.825 Y-113.748 I-12.67 J8.111 N24 X-140.629 Y-116.614 I-7.582 J8.59 N25 G01 X-149.634 N26 G02 X-154.382 Y-114.983 I.334 J8.698 N27 X-156.539 Y-111.954 I3.489 J4.767 N28 G03 X-161.538 Y-109.307 I-3.823 J-1.177 </pre>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Рис. 11. Сравнение управляющих программ

сократить затраты на инструмент и материалы благодаря гибкому алгоритму управляющей программы.

Литература

1. Солкин А. Ю., Кузнецов П. К. Проблема оптимизации NC программ для механообрабатывающих станков с ЧПУ // Вестник Волжского университета им В. Н. Татищева. 2011. № 17. С. 90–94.
2. Морозов В. В. Программирование обработки деталей на современных фрезерных станках с ЧПУ. Владимир: Изд-во Владимирского гос. университета, 2010. 246 с.
3. Морозов В. В. Программирование обработки деталей на современных многофункциональных токарных станках с ЧПУ. Владимир: Изд-во Владимирского гос. университета, 2009. 234 с.
4. Солкин А. Ю. Способы автоматизации создания управляющих программ для металлорежущего оборудования с ЧПУ // Вестник Волжского университета им В. Н. Татищева. 2012. № 2(19). С. 165–168.
5. Ловыгин А. А. Теверовский Л. В. Современный станок с ЧПУ и CAD/CAM система. М.: ДМК Пресс, 2015. 280 с.
6. Тугенгольд А. К. Система интеллектуального управления станками // Станки и инструменты (СТИИ). 2008. № 12. С. 10–15. URL: <https://lib-bkm.ru/13605> (дата обращения 10.10.2018).
7. Кошкин В. Аппаратные системы числового программного управления. М.: Машиностроение, 1989. 260 с.
8. Суханов Ю. С. Проект «Короли» и «капуста» на ниве САМ. Действительные и мнимые лидеры мирового рынка САМ в 2014 году. Часть II. Рейтинги САМ-вендоров // CAD/CAM/CAE Observer. 2016. №. 1. С. 24–34.
9. Невлюдов И. Ш., Великодный С. С., Омаров М. А. Использование CAD/CAM/CAE/CAPP при формировании управляющих программ для станков с ЧПУ // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2010. № 2 (44). С. 37–44.
10. Казанцев М. С., Васильев Н. С. Оценка трудоемкости разработки управляющих программ современных САМ-системах // Перспективы науки. 2014. № 12 (63). С. 91–94.
11. Казанцев М. С. Метод оценки трудоемкости разработки управляющих программ для изготовления группы деталей на станах с ЧПУ // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2015. № 4. С. 322–324.
12. Казанцев М. С. Основные факторы, влияющие на трудоемкость разработки управляющих программ на современных САМ-системах // Национальная ассоциация ученых. 2015. № 3–3(8). С. 63–66.
13. Янюшкин А. С., Лобанов Д. В., Ильин М. М. Автоматизация процесса создания управляющих программ для станков с ЧПУ // Механика XXI века. 2010. № 9. С. 96–98.
14. Вержаковская М. А., Аронов В. Ю., Слепнев А. А., Осанов В. А. Разработка программного модуля для оптимизации работы на станках с ЧПУ // Материалы XXV Российской научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов ПГУТИ (Самара, 22–26 января 2018 г.). Самара, 2018. С. 207.
15. Локтева С. Е. Станки с программным управлением и промышленные роботы. М.: Машиностроение, 1986. URL: <https://lib-bkm.ru/load/70-1-0-3088> (дата обращения 10.10.2018).





POST PROCESSOR DEVELOPMENT FOR OPTIMIZE WORK OF MACHINES WITH NUMERICAL PROGRAM CONTROL

MARINA A. VERZHAKOVSKAYA,

Samara, Russia, vma@psuti.ru

VITALY Y. ARONOV,

Samara, Russia, avy@psuti.ru

ALEXEY A. SLEPNEV,

Samara, Russia, a.slepnev93@mail.ru

KEYWORDS: numerical program control; CAD/CAM system; program module; postprocessor; control program; NX Unigraphics; 3D model; mechanical processing.

ABSTRACT

Developing a software module for machine tools with power program control, which meets all the requirements for the mechanical, milling processing of heavy alloys is described in this work. The relevance of the topic for this development is the need to improve and accelerate the machining of parts, through the introduction of the developed software module. The purpose of this work is the development of a software module for the automation of work on machine tools with numerical program control for the enterprise LLC Samara Special Alloys Plant. The object of the study is the workshop for machining parts, equipped with machine tools with numerical control. The subject of research is the process of analyzing systems with numerical program control and the optimal way to implement a software module (postprocessor). The work discusses the process of creating a postprocessor and control program for machine tools with numerical control. A postprocessor is a module that converts a file of toolpaths and technological commands, calculated by a CAM or CAD / CAM system processor, into a control program file in strict accordance with the manual programming technique requirements of a specific machine-CNC system. The following software was used to develop a software module for optimization on work on CNC machines: CAD / CAM system NX Unigraphics 10 (the system is needed to create a 3D model of the future part and create control programs for the CNC machine), PostBuilder (a postprocessor generator, the system is needed to create a 3D model of the future part and create control programs for a CNC machine), Cimko Edit (necessary for virtual modeling, finished control program demonstration). The developed postprocessor main feature is that the control program code is recorded in cycles. During cyclic operation, the movement speed of the tool increases, smoothness increases, and the roughness of the workpiece decreases. Cycles force the tool to move smooth-

ly over a given radius. In the individual coordinates case, the tool moves intermittently, therefore the tool remain on the part traces. In conclusion, a comparative analysis of the standard and developed in this work modules. The developed postprocessor allows to make correct, more convenient control programs. From an economic point of view, the postprocessor allows you to reduce the cost of tools and materials thanks to a flexible control program algorithm.

REFERENCES

1. Solkin A. Yu., Kuznetsov P.K. Problem of optimization of NC programs for the NC machine tooling units]. *Vestnik of Volzhsky University named after V.N. Tatishchev*. 2011. No. 17. Pp. 90-94. (In Russian)
2. Morozov V.V. *Programmirovaniye obrabotki detaley na sovremennykh frezernykh stankakh s CHPU: ucheb. posobiye* [Programming parts processing on modern milling machines with CNC: studies. Allowance]. Vladimir: Vladimir State University Publ., 2010. 246 p. (In Russian)
3. Morozov V.V. *Programmirovaniye obrabotki detaley na sovremennykh mnogofunktsional'nykh tokarnykh stankakh s CHPU* [Programming the processing of parts on modern multifunctional lathes with CNC: studies. Allowance]. Vladimir: Vladimir State University Publ., 2009. 234 p. (In Russian)
4. Solkin A. Yu. Methods of automating the creation of control programs for cutting equipment with PNC. *Vestnik of Volzhsky University named after V.N. Tatishchev*. 2012. No. 2 (19). Pp. 165-168. (In Russian)
5. Lyovygin A. A. Teverovskiy L.V. *Sovremennyy stanok s CHPU i CAD/CAM sistema*. [Modern CNC machine and CAD/CAM system]. Moscow: DMK Press, 2015. 280 p.
6. Tugengold A.K. Sistema intellektual'nogo upravleniya stankami [System of intellectual control of machine tools]. *Stanki i instrumenty* [Machines and tools]. 2008. No. 12. Pp. 10-15. URL: <https://lib-bkm>.



ru/13605 (date of access 10.10.2018). (In Russian)

7. Koshkin V. *Apparatnyye sistemy chislovogo programmogo upravleniya* [Hardware systems of numerical program control]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1989. 260 p. (In Russian)

8. Sukhanov Yu.S. *Proyekt «Koroli» i «kapusta» na nive SAM. Deystvitel'nyye i mnimyye lidery mirovogo rynka SAM v 2014 godu. Chast' II. Reytingi CAM-vendorov* [The project "Kings" and "cabbage" in the field of the CAM. Actual and imaginary leaders of the global CAM market in 2014. Part II. Ratings of CAM-vendors]. *CAD / CAM / CAE Observer*. 2016. No. 1. Pp. 24-34. (In Russian)

9. Nevludov I. Sh., Velikodny S.S., Omarov M.A. Usage CAD / CAM / CAE / CAPP at formation of controlling programs for machine tools with CNC (Computer Numerical Controlled). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2010. No. 2 (44). Pp. 37-44. (In Russian)

10. Kazantsev M.S., Vasilyev N.S. The Evaluation of the Time Required to create a CNC Machine Program Using Modern CAM Systems. *Prospects for science*. 2014. No. 12 (63). Pp. 91-94. (In Russian)

11. Kazantsev M.S. Method for evaluation of time expenditures of numerical control program development for a workpiece set production using a CAM system. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroyeniye*. [Journal of Instrument Engineering]. 2015. No. 4. Pp. 322-324. (In Russian)

12. Kazantsev M.S. State issue simulation process waterjet machining. *Natsional'naya assotsiatsiya uchenykh* [National Association of Scientists]. 2015. No. 3-3 (8). Pp. 63-66. (In Russian)

13. Yanushkin A.S., Lobanov D.V., Ilyin M.M. Avtomatizatsiya protsessa sozdaniya upravlyayushchikh programm dlya stankov s CHPU

[Automation of the process of creating control programs for CNC machines]. *Mekhaniki XXI veku*. [Mechanics of the XXI century]. 2010. No. 9. Pp. 96-98. (In Russian)

14. Verzhakovskaya MA, Aronov V. Yu., Slepnev A.A., Osanov V.A. *Razrabotka programmogo modulya dlya optimizatsii raboty na stankakh s CHPU* [Development of a software module for optimization of work on CNC machines]. *Materialy XXV Rossijskoj nauchno-tekhnicheskoj konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov PGUTI* [Proceedings of the XXV Russian Scientific and Technical Conference of the faculty, researchers and graduate students of PGUTI. Samara, January 22 – January 26, 2018]. Samara, 2018. P. 207. (In Russian)

15. Lokteva S.E. *Stanki s programmym upravleniyem i promyshlennyye roboty* [Machines with software control and industrial robots]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1986. URL: <https://lib-bkm.ru/load/70-1-0-3088> (date of access 10.10.2018). (In Russian)

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Verzhakovskaya M.A., PhD, Docent, Associate Associate Professor at the Department of Software and Management in Technical Systems, Volga State University of Telecommunications and Informatics;
Aronov V.Yu., PhD, Associate Professor at the Department of Software and Management in Technical Systems, Volga State University of Telecommunications and Informatics;
Slepnev A.A., Programmer-technologist of the metalworking workshop of the Samara Special Alloys Plant.

For citation: Verzhakovskaya M.A., Aronov V.Yu., Slepnev A.A. Post processor development for optimize work of machines with numerical program control. *H&ES Research*. 2019. Vol. 11. No. 2. Pp. 40-50. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10258 (In Russian)





doi: 10.24411/2409-5419-2018-10259

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДОСТУПНОСТИ ИНФОРМАЦИИ И ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЕЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

ВОРОБЬЕВ
Евгений Германович

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена выявлению особенностей использования математического моделирования в целях разработки оптимальных планов восстановления деятельности объектов информатизации министерств и ведомств РФ после чрезвычайных ситуаций и целенаправленных воздействий. Разработаны предложения по математическому аппарату оценки качества разработанных планов. Целью исследования являлась разработка набора супериндикаторов качества планирования обеспечения непрерывности функционирования объектов информатизации министерств и ведомств и обеспечения доступности информации. Предложена модель управления доступностью информации для реализации в России требований международных классов восстановления информационных технологий. Предложена аналитическая модель функционирования системы обеспечения доступности информации и ее подсистемы резервирования и восстановления данных. Показаны требования международных стандартов и других нормативных документов, которые должны выполняться в том случае, когда организация эксплуатирует импортные аппаратные и программные средства. Приведены расчетные показатели для оценки качества функционирования восстанавливаемой информационной системы, учитывающие влияние развития инцидента на целевую точку восстановления с точки зрения требуемого оперативного времени. Показана возможность перехода от стохастической модели угроз к детерминированной модели восстановления при решении целевой задачи. Предлагаемый математический аппарат позволяет оценивать адекватность планов обеспечения непрерывности деятельности и восстановления после бедствий, а также производить оптимальное планирование при создании системы обеспечения доступности информации министерств и ведомств РФ. Он, также, позволяет на основе введенной шкалы индикаторов создавать программные комплексы, автоматизирующие действия специалиста службы безопасности или других разработчиков организационных и технических процедур в интересах министерств и ведомств РФ.

Сведения об авторе:

к.т.н., доцент, заведующий кафедрой
 информационной безопасности
 Санкт-Петербургского государственного
 электротехнического университета «ЛЭТИ»
 имени В.И. Ульянова (Ленина),
 г. Санкт-Петербург, Россия, vrbyug@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: доступность; информация; непрерывность; функционирование; супериндикаторы; качество.

Для цитирования: Воробьев Е.Г. Математические модели управления системой обеспечения доступности информации и оценки качества ее функционирования // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 2. С. 51-62. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10259

Введение

Актуальность задачи исследования обусловлена необходимостью выполнения требований ГОСТ Р 53131–2008 «Защита информации. Рекомендации по услугам восстановления после чрезвычайных ситуаций функций и механизмов безопасности информационных и телекоммуникационных технологий», а также ряда других нормативных документов и приказов ФСТЭК РФ по обеспечению доступности информации, как в отношении значимых объектов информационной инфраструктуры, так и автоматизированных систем в защищенном исполнении в целом. Для министерств и ведомств РФ характерна также необходимость выполнения требований информационной безопасности при международном взаимодействии, что требует учета западных разработок требований в данной области.

Требование обеспечения доступности информации, как в западной, так и отечественной практике опирается на третий раздел информационной безопасности, который включает защиту объектов информатизации и функциональных отделов организаций от возникновения сбоев, отказов, аварий и катастроф, а также быстрое и надежное восстановление деятельности после таковых. Вместе с тем, опыт применения в РФ международных и отечественных разработок показывает, что на качество разрабатываемых планов обеспечения непрерывности деятельности организаций и планов восстановления после бедствий сильно влияют российские особенности внедрения требований безопасности в практическую деятельность даже на уровне государственных структур.

Теоретические положения

В России не существует специальных институтов, занимающихся данной проблемой, аналогичных международным институтам BCI и DRI. Только московская компания JetInfoSystem является ассоциированным членом BCI, переводит и издает на русском языке его материалы. При этом переводные материалы носят ограниченный характер общих рекомендаций по планированию обеспечения доступности информации и технологическому обеспечению непрерывности деятельности организаций. Ряд имеющихся отечественных публикаций носит узкий прикладной характер и посвящен решению ограниченного круга инженерных задач для конкретных программно-аппаратных средств в рамках теории надежности. В работах В. А. Герасименко, Ю. Г. Ростовцева, П. Л. Чебышева, А. А. Маркова, А. М. Ляпунова и некоторых других авторов [1] разработаны теоретические основы общей теории защиты информации и рассмотрены некоторые принципиальные идеи моделирования систем обеспечения доступности информации (СОДИ), однако при этом не учитываются особенности управления как важнейшего процесса организации применения средств и механизмов защиты.

В работах В. И. Арнольда [2] и его учеников (И. А. Бogaевского, А. Н. Варченко, В. А. Васильева, А. Б. Гивенталя, В. В. Горюнова, С. М. Гусейн-Заде, В. М. Закалюкина, М. Э. Казаряна, В. Д. Седых) в рамках теории катастроф [3] предложены количественные модели и методы оценивания качества функционирования вычислительных систем в условиях чрезвычайных ситуаций, но некоторые результаты данных авторов, а также теории восстановления В. И. Чернецкого [4], зачастую получены при достаточно больших допущениях и представляются не всегда адекватными для анализа сложных вычислительных систем. В известных работах [5, 8–10] заложены принципы специальных методов теории массового обслуживания. Однако комплексных методов управления информационными ресурсами с учетом специфики современных сложных вычислительных систем, облачных и других технологий и динамических условий целенаправленных программно-технических воздействий в данных работах не представлено. Работа О. Ю. Гаценко [6] содержит методы оптимизации восстановительного резервирования информации, а также двухкритериальную организацию контроля и восстановления целостности информации (стратегии восстановления) и позволяют выбрать контрольные точки при неявном внешнем воздействии, но в этих работах не рассматриваются методы восстановления данных, сосредотачиваясь только на управленческих процедурах.

Автором данной статьи предлагается адаптированная к отечественной практике методика разработки BCP и DRP [7], а также математический аппарат оптимального планирования при создании системы обеспечения доступности информации (СОДИ) министерств и ведомств РФ.

Модель управления доступностью информации

Выделение отдельной системы обеспечения доступности информации внутри системы управления информационной безопасностью министерства было продиктовано многими особенностями реализации, которые необходимо учитывать при ее создании и эксплуатации. Задачей системы обеспечения непрерывности функционирования является достижение требуемого исхода операции — выхода на штатное функционирование информационной системы министерства при заданном расходе ресурсов, за заданное время и характеризуется заданным набором количественных данных. В западной практике, на основании разработок международного института BCI существует следующая модель реагирования на инцидент ИБ, связанный с обеспечением восстановления деятельности [8, 9, 10]:

Целевая точка восстановления данных (ЦТВД) — интервал времени, предшествующий аварии, за который допускается потеря данных (за счет возможностей системы по восстановлению данных с резервных копий). Косвенно этот показатель диктует требуемое время создания по-



Рис. 1. Модель информационного воздействия

следней копии, а также счетные показатели для системы резервного копирования и архивирования.

Целевое время восстановления (ЦВВ) — допустимый интервал времени после аварии, необходимый для восстановления ИТ-сервисов (рис. 1).

Для качественной оценки и сравнения непрерывности ИТ-сервисов конкретной вычислительной системы используется комплексный качественный показатель — класс восстановления.

Мерой данного показателя является шкала классов с качественным описанием технологий необходимых для удовлетворения требований по ЦТВД и ЦВВ. Рассмотрим классы восстановления ИТ-сервисов для существующих вычислительных комплексов и технологий восстановления (Табл. 1).

Исследование эффективности процесса функционирования СОДИ представляет собой двуединую задачу её анализа и оптимального синтеза. При этом первым этапом решения задачи анализа является этап оценивания эффективности, который из-за многообразия объектов информатизации и реализуемых ими BCP и DRP и обусловленного этим многообразия их моделей, требующих индивидуального подхода, оказывается главным этапом анализа.

Расчет вероятности выполнения задачи обеспечения доступности информации в конкретных условиях предполагает проведение системного анализа, схема которого приведена на рис. 2 [11].

На рисунке 2 приняты следующие сокращения:

ОК — операционный комплекс (Объект информатизации (ОИ) ИС);

Таблица 1

Классы восстановления

<p>Класс восстановления 1 ЦВВ — 4 часа; ЦТВД ~ 0 часов (минимальная потеря данных)</p>
<p>Класс восстановления 2 ЦВВ < 24 часов; ЦТВД ~ 0 часов (минимальная потеря данных)</p>
<p>Класс восстановления 3 ЦВВ < 5 дней; ЦТВД < 24 часов</p>
<p>Класс восстановления 4 ЦВВ — 4 недели (целевое значение); ЦТВД < 24 часов</p>

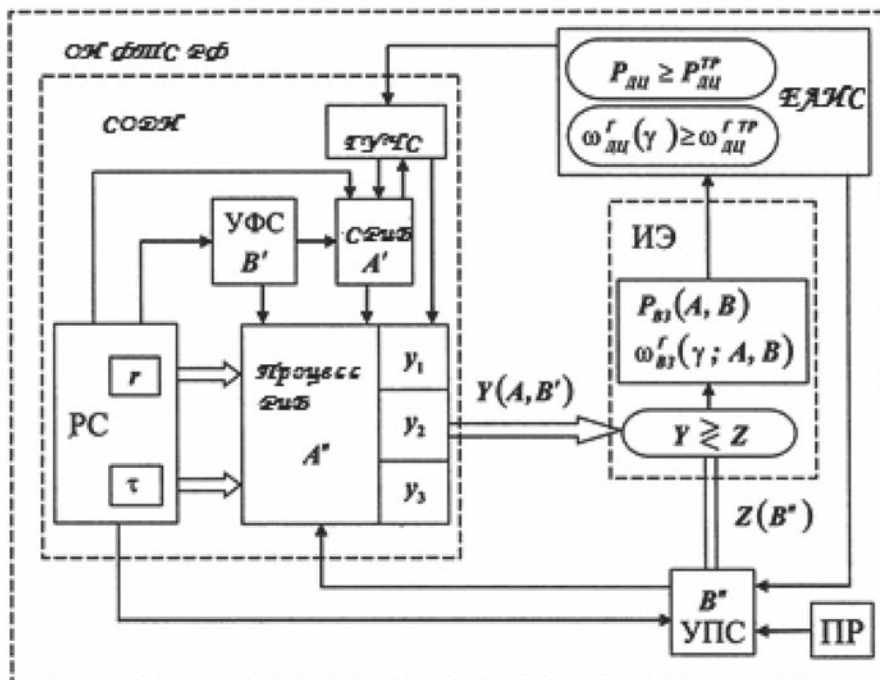


Рис. 2. Схема анализа объекта исследования

ОС — операционная система (Система обеспечения доступности информации (СОДИ));

ССС — суперсистема (ИС, министерство или ведомство в целом);

ОУП — орган управления (диспетчер, группа управления чрезвычайной ситуацией (ГУЧС) и аварийно-восстановительные команды (АВК));

СРiВ — система резервирования и восстановления;

Процесс РiВ — процесс резервного копирования, архивирования и восстановления информации;

РС — ресурсы;

УФС — условия функционирования СРiВ;

УПС — условия применения СРiВ;

ПР — противник (природа, конкурент и т. д.);

ИЭ — измеритель эффективности процесса РiВ (операции).

В отличие от идеальных условий применения СОДИ, для которых существует методология международных институтов VCI и DRI, защищенность от чрезвычайных ситуаций и программно-технических воздействий предполагает формирование математической модели информационного инцидента.

Количественная характеристика неопределенности стохастической ситуации при функционировании СОДИ ИС

При исследовании процессов функционирования типовой ИС и ее СОДИ можно выделить следующие три составляющие:

– детерминированные процессы: процессы функционирования вычислительной техники и сетей (определяемые тем, что они полностью созданы человеком) и информационные процессы в ЕАИС (представления, хранения, обработки, передачи информации — по той же причине).

– случайные процессы: техногенные и стихийные факторы, влияющие на информацию.

– неопределенная составляющая: обусловлена недостаточностью или отсутствием наблюдений, необходимых для определения её вероятностных свойств. К таковой можно отнести взаимосвязи в цепочечных инцидентах информационной безопасности, когда возможно возникновение сложных причинно-следственных связей.

Статистические данные об угрозах ИС требуют знания закона распределения случайных величин для анализируемых сведений из отдела эксплуатации ИС и региональных центров МЧС.

Поскольку центральной задачей восстановления деятельности ИС является восстановление данных как ресурса, размер потерянных данных можно описать случайной величиной z (по отношению к допустимым потерям, имеющей свой закон распределения). Тогда вероятность восстановления (события A) описывается следующим выражением [12]:

$$p = P(\hat{A}) = P(\hat{z} < a) = \int_{-\infty}^a dF_z(z) = F_z(a). \quad (1)$$

Тогда для стохастического индикатора множества A

$$P(\hat{\omega}_A = 1) = F_z(a);$$



$$\begin{aligned} \Phi_{\hat{\omega}_A}(\omega) &= R_z(a) \cdot \delta(\omega) + F_z(a) \cdot \delta(\omega-1); \\ F_{\hat{\omega}_A}(\omega) &= R_z(a) \cdot \Delta(\omega) + F_z(a) \cdot \Delta(\omega-1). \end{aligned} \quad (2)$$

Начальный момент k -го порядка распределения индикатора $\hat{\omega}_A$ определяется соотношением

$$\begin{aligned} \nu_k [\hat{\omega}_A]^d &= M [\hat{\omega}_A^k] = \overline{\omega^k}_A = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \omega^k dF_{\hat{\omega}_A}(\omega) = F_z^k(a), [k=1(1)\dots]. \end{aligned} \quad (3)$$

Следовательно, математическое ожидание и дисперсия равны:

$$\begin{aligned} M_{\hat{\omega}_A} &= \overline{\omega^1}_A = F_z(a); \\ D_{\hat{\omega}_A} &= \overline{\omega^2}_A - \overline{\omega^1}_A^2 = F_z^2(a) - F_z^2(a) = \\ &= F_z(a) \cdot R_z(a). \end{aligned} \quad (4)$$

В данном случае $\hat{\omega}_{A_y} = \hat{\omega}_{A'}(y) = \Delta(y - \hat{z})$, то есть индикатор случайного события A_y (восстановление информации при наличии ресурса резервных данных) представляет собой случайную функцию, одномерные законы распределения которой имеют следующие выражения:

$$\begin{aligned} \Phi_{\hat{\omega}_{A_y}}(\omega; y) &= R_z(y) \cdot \delta(\omega) + F_z(y) \cdot \delta(\omega-1); \\ F_{\hat{\omega}_{A_y}}(\omega; y) &= R_z(y) \cdot \Delta(\omega) + F_z(y) \cdot \Delta(\omega-1). \end{aligned} \quad (5)$$

Стохастический индикатор $\hat{\omega}_A(y)$ является функциональным [11–12].

Если переменная возможных потерь данных \hat{z} , определяющая операционную ситуацию, связана с наличием резервных данных в памяти компьютерных систем ИС переменной \hat{y} , то для решения поставленной задачи необходимо знать закон совместного распределения случайного вектора \hat{y}, \hat{z} . Допустим, что известна плотность распределения $\varphi_{\hat{y}, \hat{z}}(y, z)$. Тогда решение может быть представлено в одной из следующих форм:

$$\begin{aligned} P(\hat{A}_{\hat{y}}) &= P(\hat{z} < \hat{y}) = P[\hat{y}, \hat{z} \in (H)] = \\ &= \iint_{(H)} \varphi_{\hat{y}, \hat{z}}(y, z) dy dz, \end{aligned} \quad (6)$$

где $(H); \{\hat{y}, \hat{z} : z < y\}$.

$$P(\hat{A}_{\hat{y}}) = P(\hat{z} < \hat{y}) = P(\hat{u} < 0) = \int_{-\infty}^0 \varphi_{\hat{u}}(u) du, \quad (7)$$

где $\hat{u} = \hat{z} - \hat{y}$;

$$P(\hat{A}_{\hat{y}}) = P(\hat{z} < \hat{y}) = P(\hat{\vartheta} \geq 0) = \int_0^{\infty} \varphi_{\hat{\vartheta}}(\vartheta) d\vartheta, \quad (8)$$

где $\hat{\vartheta} = \hat{y} - \hat{z}$.

Так как воздействия на информацию предопределены для злоумышленника, но являются случайным процессом для СРиВ, а ресурсы данных предопределены для конкретной СРиВ, но случайны для множества ИС в едином информационном пространстве РФ (ЕИП), случайные величины \hat{y} и \hat{z} взаимно независимы. Тогда

$$\begin{aligned} P(\hat{z} < \hat{y}) &= \int_{-\infty}^{\infty} F_z(y) dF_{\hat{y}}(y); \\ P(\hat{y} > \hat{z}) &= \int_{-\infty}^{\infty} R_y(z) dF_z(z); \end{aligned} \quad (9)$$

Если ввести следующие обозначения

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_1 &= \omega_1(\hat{y}) = F_z(\hat{y}); \\ \hat{\omega}_2 &= \omega_2(\hat{z}) = R_y(\hat{z}), \end{aligned} \quad (10)$$

то выражения могут быть представлены в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} P(\hat{z} < \hat{y}) &= M[\hat{\omega}_1] = \bar{\omega}_1 \\ P(\hat{y} > \hat{z}) &= M[\hat{\omega}_2] = \bar{\omega}_2 \end{aligned} \right\} P\bar{\omega}_1 = \bar{\omega}_2; \quad (11)$$

Случайные величины $\hat{\omega}_1$ и $\hat{\omega}_2$ являются стохастическими супериндикаторами. Поскольку каждому двухместному дважды неопределённому предикату соответствуют два супериндикатора, то для отличия их друг от друга они снабжены индексами (номерами). Поэтому в дальнейшем они также будут называться индексными [13–14].

Из соотношения (11) следует, что

$$P(\hat{z} < \hat{y}) = \bar{\omega}_1 = \int_0^1 \omega dF_{\hat{\omega}_1}(\omega) = \bar{\omega}_2 = \int_0^1 \omega dF_{\hat{\omega}_2}(\omega), \quad (12)$$

где $F_{\hat{\omega}_1}(\omega), F_{\hat{\omega}_2}(\omega)$ — соответственно функции распределения супериндикаторов $\hat{\omega}_1$ и $\hat{\omega}_2$.

Итак, при вычислении вероятностей случайных событий по вышеприведенным формулам, в сущности, вычисляются математические ожидания соответствующих стохастических индикаторов. Однако известно, что любой конечный набор числовых характеристик случайной вели-

чины менее информативен, чем закон её распределения, т.е. при использовании только перечисленных выше формул теряется значительная часть информации. Поэтому произведем трансформацию распределений $F_{\hat{y}}(y)$ и $F_{\hat{z}}(z)$ соответственно в распределения $F_{\hat{\omega}_1}(y)$ и $F_{\hat{\omega}_2}(z)$.

Супериндикаторы качества функционирования СОДИ

Так как восстановление деятельности организации определяется восстановлением полной инфраструктуры, включая помещения, мебель, офисную технику, а также ИС как совокупности аппаратного, программного и информационного обеспечения (данных), в свою очередь как множества ресурсов для работы СОДИ, а множество воздействий определяется количеством способов реализации угроз и их последствиями, исходные переменные \hat{y} и \hat{z} являются r -мерными векторами \hat{Y}_r и \hat{Z}_r соответственно, а r является рангом индексного стохастического супериндикатора. Тогда

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_1^r &= \omega_1(\hat{Y}_r) = F_{\hat{z}_r}(\hat{Y}_r); \\ \hat{\omega}_2^r &= \omega_2(\hat{Z}_r) = R_{\hat{y}_r}(\hat{Z}_r); \end{aligned} \quad (13)$$

При построении функций распределения супериндикаторов используем графический метод, считая, что случайные величины переменные \hat{y} и \hat{z} подчинены нормальным законам распределения (рис. 3) [11, 15].

Таким образом, возможность восстановления деятельности ИС в условиях воздействия различных факторов и наличия собственных ресурсов графически будет отображаться следующим образом (рис. 4):

Если считать функцию, описывающую деградацию ресурсов объекта информатизации в результате множества

воздействий прямой, а функцию восстановления обратной, то можно записать условия функционирования СОДИ ИС следующим образом:

$$\begin{aligned} y &= f_1(f_2(\dots(f_k(x))\dots)) F x = \\ &= f_k^{-1}(f_{k-1}^{-1}(\dots(f_1^{-1}(y))\dots)). \end{aligned} \quad (14)$$

При этом все функции f в реальных условиях всегда определены, когда созданы или обусловлены человеком.

r — мерность векторов \hat{Y}_r и \hat{Z}_r приводит к необходимости построения многомерных графических диаграмм.

Так международный стандарт PAS-56 использует для оценки возможности обеспечения непрерывности функционирования в организации, их DRP-планов и BCM в целом многовекторные диаграммы. Также, в практике оценки параметров информационной безопасности широко используется отнесение к зонам красного, желтого и зеленого цвета, так например уязвимости сильной степени отмечаются маркерами красного цвета, средней степени — желтого, слабой степени — зеленого.

В данной работе предлагается использовать оба данных подхода. Тогда качество функционирования СРиВ для ЕАИС и организации в целом исходя из ведущего показателя операции — наличия основных и резервных ресурсов различного типа может быть оценено по следующей диаграмме (рис. 5). На диаграмме символами R_i обозначены ресурсы необходимые для функционирования как ИС, так и организации в целом.

При этом деградация ресурсов в результате ЧС или целенаправленных воздействий (ЦНВ) будет отображаться перемещением точки на конкретном векторе диаграммы от зеленой к красной линии, а восстановление ресурса — обратным движением.

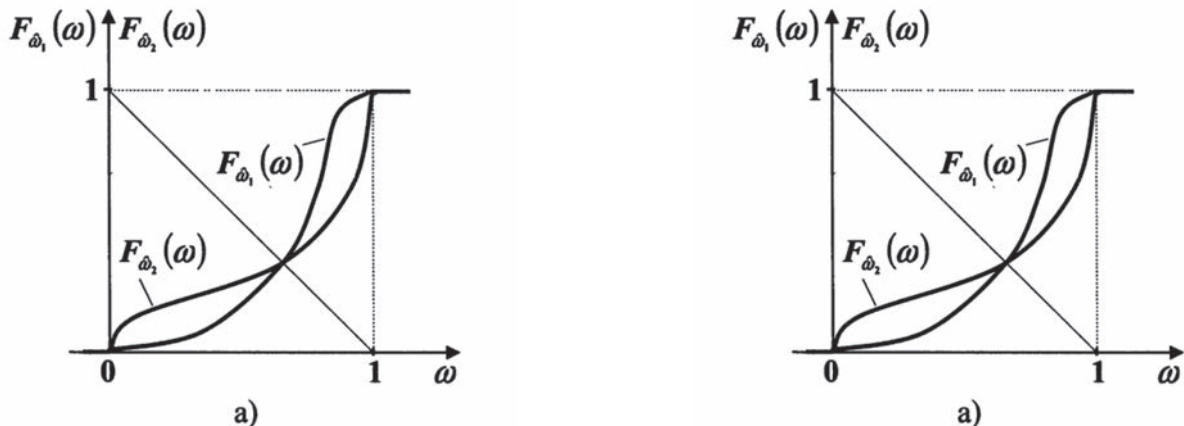


Рис. 3. Функция распределения супериндикаторов

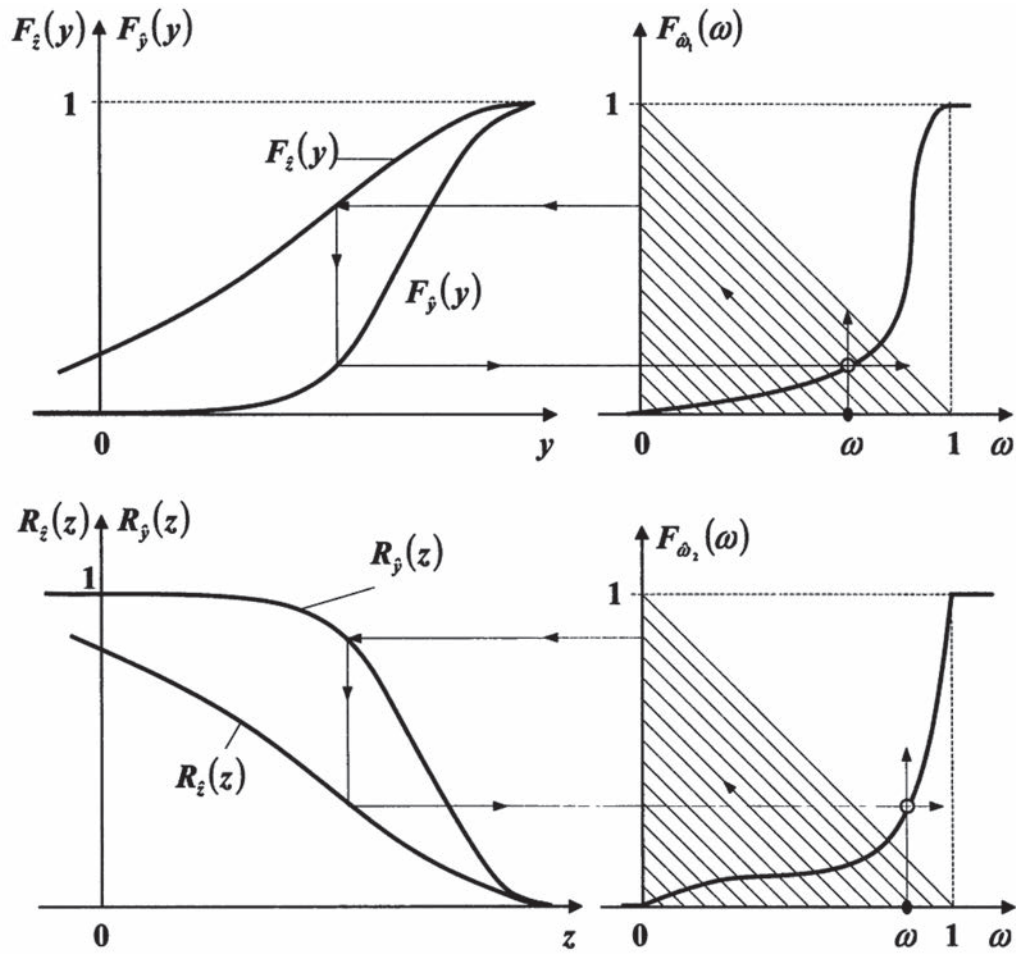


Рис. 4. Функция распределения супериндикаторов

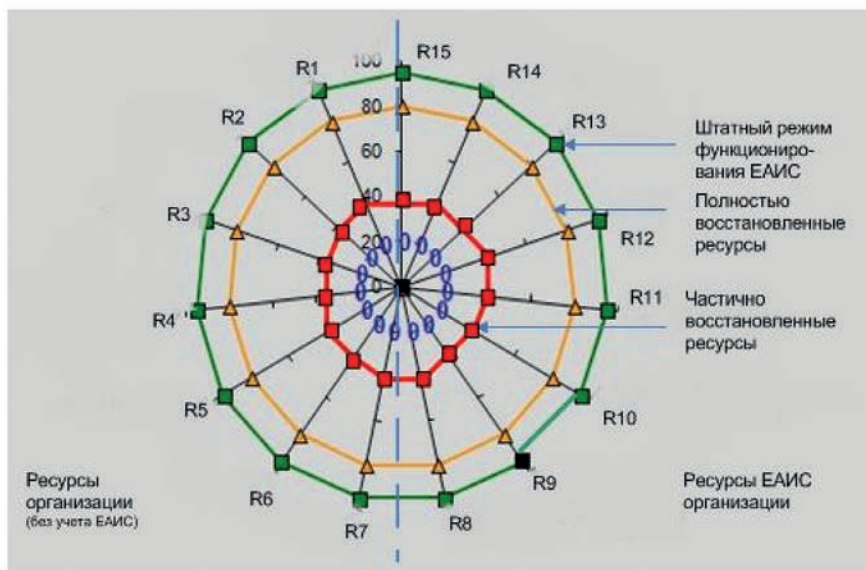


Рис. 5. Диаграмма учета восстановления ресурсов организации

Оценивать варианты СОДИ возможно с помощью следующего математического аппарата. Согласно формуле Гирона площадь произвольного треугольника по трем известным сторонам может быть высчитана по следующей формуле:

$$S = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}, \quad (15)$$

где периметр $p = \frac{(a+b+c)}{2}$, a, b, c — стороны треугольника.

Тогда суммарная оценка системы есть сумма площадей треугольников образованных парами соседних значений параметров:

$$K = \sum_1^n S_n, \quad (16)$$

где n — номер треугольника.

Таким образом, имеется возможность сравнивать различные системы по совокупности параметров, или же, построив треугольник для любых двух показателей одной системы (по выбору — расположив их рядом, как длинные стороны), сравнить его с треугольником показателей другой системы.

Как было показано выше, ведущим показателем для СОДИ в силу уникальности является ресурс данных. На основании ГОСТ РВ 51987-02 к данным и функционированию АС в целом выдвигается ряд дополнительных показателей [11], которые могут быть оценены в вероятностном виде (от 0 до 1). Сравнение качества функционирования ИС может быть выполнено по методике расчета сумм площадей треугольников по диаграмме на рис. 6.

Главными показателями являются:

1. НПИ — надежность представления запрашиваемой или выдаваемой принудительно информации (выполнения задаваемых технологических операций).
2. СПИ — своевременность представления запрашиваемой или выдаваемой принудительно информации (выполнения задаваемых технологических операций).
3. ПИИ — полнота используемой информации.
4. АИИ — актуальность используемой информации.
5. БИПК — безошибочность информации после контроля.
6. КОИ — корректность обработки информации.

Шесть приведенных показателей позволяют оценить качество работы СОДИ и ее СРiВ с информацией, т.е. именно данными. Причем ведущим показателем является полнота данных (ПИИ), отражающая полное восстановление данных (или их наличие), а выход на штатный режим функционирования предполагает работу по их актуализации (АИИ).

Безошибочность действий должностных лиц является полностью случайной величиной и должна задаваться из области допустимых значений.

И, наконец, защищенность информации, согласно нормативным документам ФСТЭК определяется вектором из трех равноценных компонентов:

<конфиденциальность, целостность, доступность>, или в развернутом виде:

<защищенность от НСД, защищенность от несанкционированного распространения программ НСРП, физическая целостность, логическая целостность, защищенность от сбоев и отказов, возможность быстрого и надежного восстановления после возникновения ЧС>

В этом отношении ГОСТ 51987-2002 не полностью отражает расчет требуемых показателей защищенности, ограничиваясь тройкой <КИ, ЗОПТВ, ЗНСД>:

1. Конфиденциальность информации.
2. Защищенность от опасных программно-технических воздействий.
3. Защищенность от НСД.

Для СРiВ физическая целостность (защищенность от уничтожения и модификации данных и программного обеспечения) и логическая целостность (непротиворечивость) информации достигается путем резервирования ее как ресурса, в силу этого она уже учтена в диаграмме на рис. 5.

В диаграмме на рис. 6 вектором «надежность представления информации» (НПИ) учтены все показатели, влияющие на защищенность от сбоев и отказов, а также устойчивость к стихийным факторам.

Главный совокупный показатель качества СРiВ оцениваемый диаграммой на рис. 5 демонстрирует возмож-

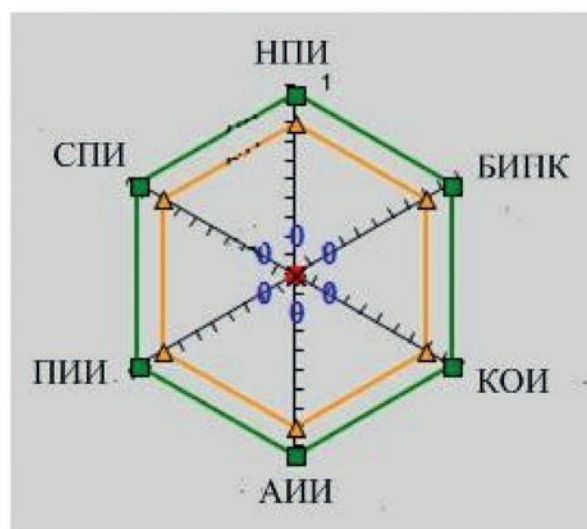


Рис. 6. Диаграмма показателей качества функционирования ЕАИС

ность быстрого и надежного восстановления после возникновения ЧС и целенаправленных воздействий.

Конфиденциальность информации, содержащейся в данных, защищенность от несанкционированного доступа к ней, а также защищенность от несанкционированного распространения программ (НСРП) должны задаваться из области допустимых значений. Методика расчета защищенности от программно-технических воздействий по ГОСТ РВ 51987–02 также недостаточна, так как использует только вероятность ПТВ на основе статистики уже случившихся за учитываемый период времени воздействий.

Влияние инцидента на планирование восстановления после бедствий

Одними из типовых документов, которые используются для создания BCP и DRP планов являются документы фирмы Microsoft для эксплуатирующих организаций (MOF). Диаграмма в верхней части рис. 7 показывает методику сравнения качества DRP планов по ресурсам времени (y_1) и физическим ресурсам объекта информатизации

(y_2). При этом вектор комплексный вектор качества должен находиться в области допустимых значений.

Диаграмма в нижней части рис. 7 отражает сущность основных фаз восстановления в случае инцидента, но, как показывает практика, данные фазы отражают правильно только ситуацию, когда не требуется эвакуация, при этом в половине случаев возникновение необходимости персоналу срочно покинуть основную площадку в связи с внешней угрозой (стихийное бедствие, внешняя техногенная катастрофа).

Все инциденты, как правило, оцениваются по информации имеющейся у ответственных за ГО и ЧС и мобилизационных отделений министерств и ведомств всех уровней в виде справок МЧС. Зоны расположения опасных объектов и возникновения стихийных бедствий могут быть охарактеризованы следующими параметрами (рис. 8):

- дальность до эпицентра опасного воздействия (R);
- скорость распространения опасного воздействия (V).

В данном случае формула $T_{зв} = R/V$ позволяет определить запас времени имеющийся у информационно-техни-

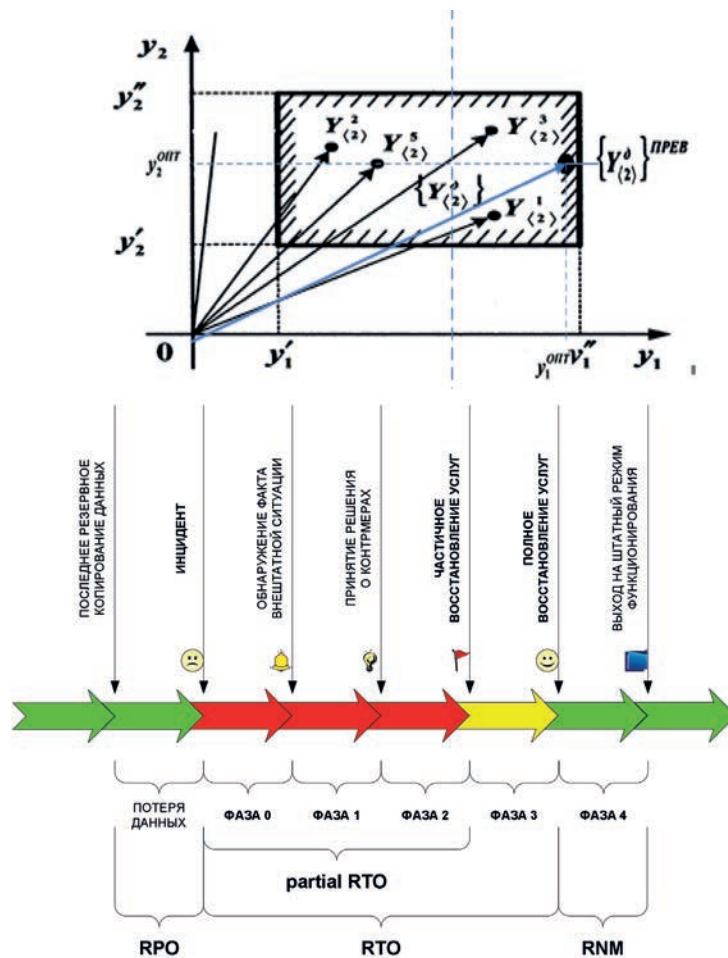


Рис. 7. Область допустимых значений оперативности и ресурсоемкости при реализации планов обеспечения непрерывности и восстановления после бедствий

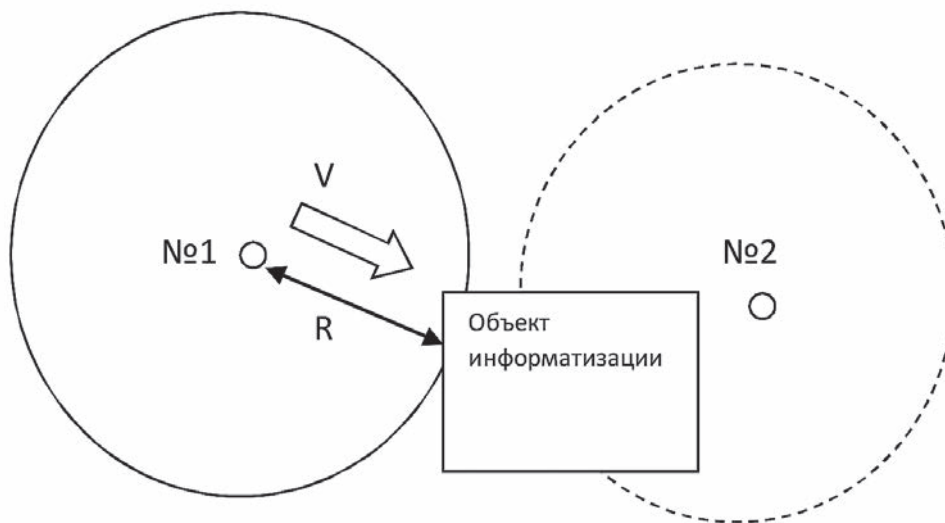


Рис. 8. Модель развития чрезвычайной ситуации



ческой службы (ИТС) и функциональных отделов на проведение процедур правильного выключения оборудования и спасения нужной информации путем запуска резервного копирования, а также вывоза имущества.

Проведенное исследование показывает, что самым важным элементом объектов информатизации подлежащим обязательному спасению в условиях отсутствия резервной площадки являются сервера баз данных и имеющиеся резервные копии. Должны быть предусмотрены процедуры на случай необходимости демонтажа и вывоза такого оборудования или правильного выключения, если опасность угрожает только персоналу (например, угроза химического заражения местности в результате техногенной катастрофы). На рис. 8 пунктиром указана зона возможного опасного воздействия для еще одного объекта.

Путем изучения перекрывающихся и не перекрывающихся опасных зон воздействия по карте местности необходимо при выработке стратегии определить возможное местоположение резервных площадок, маршруты перемещения грузов и персонала с основной площадки на резервную и трассы закладки линий связи. В случае обеспечения резервной площадки в рамках имеющихся в надежной зоне объектов организации, при невозможности вывоза оборудования возможна только потеря баз данных соответствующего уровня, что устраняется за счет накопления аналогичной информации в базах выше- и нижестоящего уровня.

Заключение

Таким образом, предлагаемая методика разработки планов обеспечения непрерывности деятельности и восстановления после бедствий, а также математический аппарат такого оптимального планирования при создании системы обеспечения доступности информации министерств и ведомств РФ позволяет на основе введенной шкалы индикаторов создавать программные комплексы, автоматизирующие действия специалиста службы безопасности или других разработчиков организационно-технических процедур в интересах министерств и ведомств РФ. Вывод заключается в том, что основным в выработке стратегического плана обеспечения непрерывности деятельности информационных служб для большинства министерств и ведомств РФ является устранение указанных выше недостатков и обеспечение необходимых показателей качества как планирования деятельности СОДИ в виде ВСП и DRP, так и качества функционирования подлежащих восстановлению информационных систем.

Литература

1. *Плоткин А.Л., Балакирев Н.Е.* История информационных технологий в СССР / Под общей ред. Ю. В. Ревича. М.: КНИМА (ИП Берег Е. В.), 2016. 416 с.

2. *Бабенко Л.К., Басан А.С., Журкин И.Г., Макаревич О.Б.* Защита данных геоинформационных систем. М.: Гелиос АРВ, 2010. 336 с.

3. *Будников С.А., Паршин Н.В.* Информационная безопасность автоматизированных систем. Воронеж: ГУП ВО «Воронежская областная типография — изд-во Е. А. Болховитинова», 2011. 354 с.

4. *Чернецкий В.И.* Математическое моделирование стохастических систем. Петрозаводск: Изд-во ПГУ, 2017. 488 с.

5. *Рыжиков Ю.И., Алексеев А.В., Лохвицкий В.А.* Новые грани возможностей лучевых диаграмм // Труды Восьмой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика», ИММОД-2017 (18–20 октября 2017 г.). Санкт-Петербург, 2017. С. 125–130.

6. *Гаценко О.Ю.* Защита информации. Основы организационного управления. СПб.: Сентябрь, 2001. 228 с.

7. *Воробьев Е.Г.* Обеспечение безопасности информации в единой автоматизированной информационной системе. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. 166 с.

8. *Ryzhikov Y.I.* Calculation of the Closed Multi-channel Queueing Systems // Cybernetics and Algorithms in Intelligent Systems. Proceedings of 7th Computer Science Online Conference. 2018. Vol. 3. Pp.125–132.

9. *Kokorin S.V., Sokolov B.V., Ryzhikov Y.I.* Model and algorithm for combinational optimization of information system bandwidth // 25rd European Conference on Modelling and Simulation ECMS2011 (June, 7–10, 2011, Krakow, Poland): Proceedings of conference. 2011. Pp.166–171.

10. *Zelentsov V.A., Potryasaev S.A., Ryzhikov Y.I.* Direct modeling of queueing systems and networks // Proceedings of the Int. Conf. on Harbor Maritime and Multimodal Logistics M&S. 2014. Pp. 112–116.

11. *Петухов Г.Б., Якунин В.И.* Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. М.: АСТ, 2006. 504 с.

12. *Петухов Г.Б., Белоконь Н.К.* Методы теории стохастической индикации в исследовании операций и прикладной кибернетике. МО СССР, 1988. 191 с.

13. *Раяцкас Р.Л., Плакунов М.К.* Количественный анализ в экономике. М.: Наука, 1987. 391 с.

14. *Федулов А.А., Федулов Ю.Г., Цыгичко В.Н.* Введение в теорию статистически ненадежных решений. М.: Статистика, 1979. 279 с.

15. *Якунин В.И.* Анализ эффективности процесса функционирования информационно-справочной системы // Научно-техн. сб. (труды) «Методы получения и обработки информации». Б.м., МО СССР, 1986. Вып. 2(51). С. 72–75.



MATHEMATICAL MODELS OF ENSURING INFORMATION AVAILABILITY MANAGEMENT SYSTEM AND QUALITY ASSESSMENT OF ITS FUNCTIONING

EVGENY G. VOROBIEV

St. Petersburg, Russia, vrbuyg@mail.ru

ABSTRACT

The work is devoted to the identification features use mathematical modeling to develop optimal plans to return objects of informatization of ministries and agencies of the Russian Federation after emergencies and targeted influences. Proposals on mathematical apparatus developed by quality assessment plans. The aim of the study was to develop a set of superindicators business continuity planning quality sources of information from ministries and departments and ensuring the availability of information. The model of information availability management to implement the requirements in Russia international information technology recovery classes. Proposed analytical model of the functioning of the system of ensuring the availability of information and its data backup and recovery subsystem. Showing the requirements of international standards and other normative documents, which should only be used when the organization operates imported hardware and software. Shows the estimated indicators for assessing the quality of the restored information system development take into account the impact of the incident on the target recovery point in terms of the required operational time. The possibility of transition from stochastic model threats to deterministic models in addressing the recovery target. The proposed mathematical apparatus enables you to assess the adequacy of business continuity plans and disaster recovery, as well as to produce optimal planning when creating a system to ensure the availability of information ministries and agencies of the Russian Federation. It also allows the scale based on indicators to create software systems that automate the actions of the security service or other developers of organizational and technical procedures for ministries and departments of the Russian Federation.

REFERENCES

1. Plotkin A.L., Balakirev N.E. *Istoriya informatsionnykh tekhnologiy v SSSR* [History of information technologies in the USSR]. Moscow: KNIMA, 2016. 416 p. (In Russian)
2. Babenko L.K., Basan A.S., Zhurkin I.G., Makarevich O.B. *Zashchita dannykh geoinformatsionnykh sistem* [Data protection of geographic information systems]. Moscow: Gelios ARV, 2010. 336 p. (In Russian)
3. Budnikov S.A., Parshin N.V. *Informatsionnaya bezopasnost avtomatizirovannykh sistem* [Information security of the automated systems]. Voronezh: GUP VO "Voronezhskaya oblastnaya tipografiya – izd-vo E.A. Bolkhovitinova", 2011. 354 p. (In Russian)
4. Chernetskiy V.I. *Matematicheskoye modelirovaniye stokhasticheskikh sistem* [Mathematical modeling of stochastic systems]. Petrozavodsk: PGU Publ., 2017. 488 p. (In Russian)
5. Ryzhikov Yu.I., Alekseyev A.V., Lokhvitskiy V.A. *Novyye grani vozmozhnostey luchevykh diagram* [New sides of opportunities of beam charts]. *Trudy Vosmoy vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii po imitatsionnomu modelirovaniyu i ego primeneniyu v nauke i promyshlennosti «Imitatsionnoye*

KEYWORDS: availability; information; continuity; operation; super indicators; quality.

- modelirovaniye. Teoriya i praktika» (IMMOD-2017)* [Proceedings of the Eighth All-Russian scientific and practical conference on imitating modeling and its application in science and the industry "Imitating modeling. Theory and practice" (IMMOD-2017), St. Petersburg, October 18-20, 2017]. St. Peterburg, 2017. Pp. 125-130. (In Russian)
6. Gatsenko O. Yu. *Zashchita informatsii. Osnovy organizatsionnogo upravleniya* [Information security. Bases of organizational management]. St. Petersburg: Sentyabr, 2001. 228 p. (In Russian)
 7. Vorobyev E.G. *Obespecheniye bezopasnosti informatsii v edinoy avtomatizirovannoy informatsionnoy sisteme* [Safety of information in the uniform automated information system]. St. Petersburg: SPbGETU Publ., 2014. 166 p. (In Russian)
 8. Ryzhikov Y.I. Calculation of the Closed Multi-channel Queueing Systems. *Cybernetics and Algorithms in Intelligent Systems. Proceedings of 7th Computer Science On-line Conference*. 2018. Vol. 3.Pp. 125-132.
 9. Kokorin S.V., Sokolov B.V., Ryzhikov Y.I. Model and algorithm for combinatorial optimization of information system bandwidth. *Proceedings of 25rd European Conference on Modelling and Simulation ECMS2011 (June, 7-10, 2011, Krakow, Poland)*. 2011. Pp.166-171.
 10. Zelentsov V.A., Potryasaev S.A., Ryzhikov Y.I. Direct modeling of queueing systems and networks. *Proceedings of the Int. Conf. on Harbor Maritime and Multimodal Logistics M&S*. 2014. Pp. 112-116.
 11. Petukhov G.B., Yakunin V.I. *Metodologicheskiye osnovy vneshnego proyektirovaniya tselenapravlennykh protsessov i tselestremennykh sistem* [Methodological bases of external design of purposeful processes and purposeful systems]. Moscow: ACT, 2006. 504 p. (In Russian)
 12. Petukhov G.B., Belokon N.K. *Metody teorii stokhasticheskoy indikatsii v issledovanii operatsiy i prikladnoy kibernetike* [Methods of the theory of stochastic indication in a research of operations and applied cybernetics]. MO SSSR. 1988. 191 p. (In Russian)
 13. Rayatskas R.L., Plakunov M.K. *Kolichestvennyy analiz v ekonomike* [The quantitative analysis in economy]. Moscow: Nauka, 1987. 391 p. (In Russian)
 14. Fedulov A.A., Fedulov Yu.G., Tsygichko V.N. *Vvedeniye v teoriyu statisticheskii nenadezhnykh resheniy* [Introduction to the theory of statistically unreliable decisions]. Moscow: Statistika, 1979. 279 p. (In Russian)
 15. Yakunin V.I. *Analiz effektivnosti protsessa funktsionirovaniya informatsionno-spravochnoy sistemy* [Analysis of efficiency of process of functioning of directory system]. *Nauchno-tekhnicheskii sbornik. Metody polucheniya i obrabotki informatsii* [Scientific and technical collection "Methods of receiving and information processing"]. B.m. MO SSSR. 1986. Vol. 2(51). Pp. 72-75. (In Russian)

INFORMATION ABOUT AUTHOR:

Vorobiev E.G., PhD, Docent, the Head of "Information security" department of the St. Petersburg electrotechnical university "LETI".

РОССИЙСКАЯ НЕДЕЛЯ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

23–26
апреля
2019

Россия, Москва,
ЦВК «Экспоцентр»



СВЯЗЬ

31-я международная выставка
«Информационные
и коммуникационные технологии»



НАВИТЕХ

11-я международная выставка
«Навигационные системы,
технологии и услуги»

Темы и тренды:

5G Big Data Умный город
Геоданные и навигационные технологии
Цифровое правительство ЦОДы
Информационная **IoT** Smart Device Show
безопасность **Телеком**
Искусственный интеллект **Спутниковая связь**
Умная мобильность Российский софт
AR&VR Future TV Блокчейн
Дроны и беспилотные системы **Стартапы**

Реклама

12+

Подробнее
о выставке
«СВЯЗЬ»

www.sviaz-expo.ru

www.navitech-expo.ru

Подробнее
о выставке
«НАВИТЕХ»



Минкомсвязь
России



МИНПРОМТОРГ
РОССИИ



РОССВЯЗЬ



НП «ГЛОНАСС»
Федеральный сетевой оператор



ЭКСПОЦЕНТР





doi: 10.24411/2409-5419-2018-10260

ПРОБЛЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ И ПУТИ ЕЁ РЕШЕНИЯ

ГОВОРИТЕЛЬ

Владимир Владимирович

АННОТАЦИЯ

Представлены актуальные вопросы обеспечения качества функционирования и развития автоматизированных систем военного назначения с подробным рассмотрением факторов влияющих на их характеристики качества и необходимых мероприятий связанных с формированием решений по обеспечению качества автоматизированной системы военного назначения и её компонентов. Опыт реализации рассмотренных мероприятий несёт неопределённость с тяжело прогнозируемыми и регулярно проявляющимися несоответствиями в виде отклонений от установленных требований по допустимым значениям величин характеризующих качество эксплуатируемой автоматизированной системы военного назначения. Обработка и анализ выявленных несоответствий осуществляется субъектами жизненного цикла автоматизированной системы военного назначения в ручном режиме, без применения средств автоматизации, что приводит к существенным трудозатратам на каждом этапе жизненного цикла данной автоматизированной системы военного назначения, а также влияет на своевременность, полноту и достоверность обрабатываемой информации о постоянно проявляющихся несоответствиях характеристик качества автоматизированной системы военного назначения в процессе её функционирования и развития. Решение данной проблемы видится в создании интегрированной информационно-аналитической системы обеспечения качества автоматизированной системы военного назначения на основе технологии информационной поддержки жизненного цикла образцов изделий. Создание и функционирование данной системы позволит реализовать единую информационную среду обеспечивающую информационную поддержку экспертно-аналитической деятельности всех субъектов жизненного цикла автоматизированной системы военного назначения и своевременное формирование на её основе комплексной аналитической информации, необходимой для выработки решений, влияющих на характеристики качества автоматизированной системы военного назначения в процессе её функционирования и развития.

Сведения об авторе:

к.т.н., докторант Военной академии
воздушно-космической обороны имени
Маршала Советского союза Г.К. Жукова,
г. Тверь, Россия, govoritel@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автоматизированная система военного назначения; информационная система; средства автоматизации; качество, характеристики; жизненный цикл.

Для цитирования: *Говоритель В.В.* Проблема обеспечения качества автоматизированных систем военного назначения и пути её решения // Научно-технические исследования в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 2. С. 64-72. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10260



Проблему обеспечения качества автоматизированных систем военного назначения (АСВН) пытаются решать в рамках существующей системы менеджмента качества оборонной продукции, которая направлена на обеспечение соответствия военной продукции требованиям нормативных документов, тактико-технического задания заказчика и условиям контрактов (договоров) с субъектами жизненного цикла (ЖЦ) отвечающих за разработку, изготовление, эксплуатацию и сопровождение АСВН. Здесь под обеспечением качества понимается планируемая и осуществляемая деятельность субъектов ЖЦ АСВН направленная на выполнение требований к характеристикам качества АСВН и её компонентам в рамках системы управления качеством АСВН.

При этом процессы эксплуатации и сопровождения АСВН процедурно регламентируются системой государственных стандартов, которая была сформирована в конце XX века и ориентирована на взаимодействие всех субъектов ЖЦ АСВН (заказчик, разработчик, производитель, эксплуатант) по заранее спланированным мероприятиям: гарантийного¹, авторского² и технического³ надзоров (сервисного обслуживания⁴). В настоящее время, данное взаимодействие вышеуказанных субъектов осуществляется исключительно в ручном режиме посредством бумажного документооборота и связанных с ним процессов сбора, обработки и анализа информации по заданным характеристикам качества⁵ АСВН с целью современного формирования и реализации решений, влияющих на характеристики качества АСВН в процессе её функционирования и развития — решения по обеспечению качества АСВН (рис. 1).

Опыт реализации перечисленных мероприятий свидетельствует, что сформированные и реализованные решения по обеспечению качества АСВН несут некоторую неопределённость с тяжело прогнозируемыми и регу-

лярно проявляющимися несоответствиями, связанными с конструкторскими, производственными и эксплуатационными недостатками.

Наиболее критичной стороной проблемы обеспечения качества, функционирующей АСВН является то, что полученная, обработанная и выданная итоговая информация ответственному за принятие решений должностному лицу субъекта ЖЦ АСВН, бывает недостоверной, неполной, несвоевременной. Соответственно, использование некондиционной информации ведёт к неадекватности принимаемых решений по обеспечению качества АСВН в отношении планирования и реализации корректирующих действий по устранению выявленных несоответствий ответственными субъектами ЖЦ АСВН, которые согласно требованиям ГОСТ Р ИСО 9001 и ГОСТ РВ 0015–002 и обязаны:

- оперативно реагировать на несоответствия и предпринимать необходимые корректирующие и предупреждающие действия;
- оценивать потребность в действиях по устранению причины (причин) несоответствия во избежание их повторного возникновения. Данная оценка должна осуществляться путём анализа несоответствия и причин его проявления, а также определения наличия аналогичного несоответствия или возможности его повторного возникновения;
- выполнять необходимые действия и анализировать результативность каждого предпринятого корректирующего действия.

Такой подход соответствует идеям всеобщего управления качеством [1–5], в том числе системы управления качеством (СУК) вооружением, военной и специальной техники [6–7] и является обязательным для всех предприятий оборонно-промышленного комплекса (ОПК) с неизбежной их сертификацией согласно ГОСТ ИСО 9001 при получении лицензии на осуществление разработки, производства, испытания, установки, монтажа, технического обслуживания, ремонта, утилизации и продажи вооружения и военной техники⁶. Реализация данного подхода заключается в управлении предприятием через управление качеством производимых им изделий и услуг на всех стадиях их ЖЦ. Это, в частности, привело к целенаправленной автоматизации процессов деятельности основных субъектов ЖЦ АСВН, занимающихся разработкой и производством программно-технических компонент для АСВН, и способных самостоятельно и оперативно обеспечивать качество функционирования и развитие применяемых ими средств автоматизации деятельности, чего не скажешь об АСВН

¹ Гарантийный надзор за состоянием АСВН — это выполнение предприятиями — изготовителями работ по обеспечению исправности АСВН, совершенствованию технического обслуживания и ремонта в период эксплуатации АСВН.

² Авторский надзор за состоянием АСВН — это комплекс мероприятий, проводимых разработчиком с участием изготовителя и заказчика АСВН, связанных с непосредственным надзором за качеством изделий, входящих в состав АСВН, в течение всего времени её эксплуатации.

³ Технический надзор в процессе эксплуатации АСВН — это комплекс мероприятий, проводимых разработчиком и (или) предприятием-изготовителем с участием эксплуатирующей организации заказчика по поддержанию в исправном или работоспособном состоянии АСВН и компонентов для использования по назначению.

⁴ Понятие «сервисное обслуживание» впервые введено в действие временным положением об основах организации сервисного обслуживания ВВТ в ВС РФ (Приказ МО РФ от 27.12.2010 г. № 1919дсп), в последствии заменённым новым приказом МО РФ от 25.12.2018 г. № 33дсп и подразумевает комплекс работ (мероприятий) по поддержанию и восстановлению работоспособного или исправного состояния образца изделия и (или) восстановлению его ресурсов, проводимых сервисными организациями в войсковых (с участием специалистов воинской части) и (или) заводских условиях, в соответствии с государственным контрактом.

⁵ Согласно ГОСТ Р ИСО 9001–2015: **характеристика** — это отличительное свойство (п. 3.10.1), а **характеристика качества (качественная характеристика)** — это собственная (внутренне присущая) характеристика объекта, относящаяся к требованию (п. 3.10.2).

⁶ Постановлением Правительства РФ от 13.07.2012 № 581 (п. 5) введены требования в части обязательного наличия системы менеджмента качества, созданной и функционирующей согласно требованиям ГОСТ Р ИСО 9001.

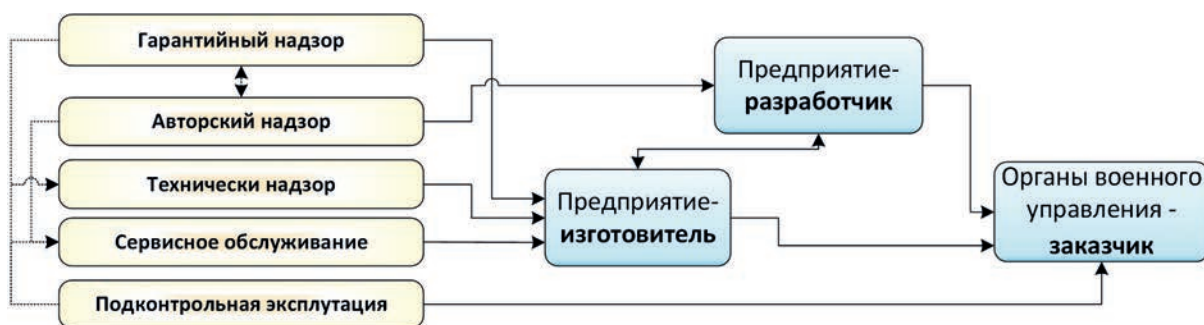


Рис. 1. Схема организации сбора, обработки и обмена информацией о состоянии АСВН в процессе функционирования и развития

эксплуатируемых различными структурными элементами Вооружённых Сил.

При этом, несмотря, на достаточно высокую оснащённость всех участников ЖЦ средствами вычислительной техники и информационно-коммуникационными технологиями, к сожалению, существующая система сбора, обработки и анализа состояния АСВН и её компонентов осуществляется в ручном режиме, без применения средств автоматизации, что приводит к существенным трудозатратам на каждом этапе ЖЦ системы [8]. Это происходит, как правило, из-за разобщённости применяемого инструментария⁷ предприятиями занимающимися проектированием, разработкой и производством сложных систем [9], а также отсутствием эффективных средств и методов сбора, обработки, анализа информации и информационного взаимодействия всех субъектов ЖЦ АСВН [10]. Особенно важным этот вопрос представляется на этапах формирования и принятия решений, влияющих на качество АСВН в процессе её функционирования и развития.

Решение данной проблемы возможно за счёт интеграции в состав АСВН подсистемы, которая будет учитывать современные принципы менеджмента качества и иметь характеристики, способные к формированию своевременных и обоснованных решений, обеспечивающих качество АСВН с учётом стадий и этапов создания (развития) и эксплуатации АСВН [11–12], где стадии и этапы характеризуют основные контрольные точки достижения системой определённого качества в её ЖЦ и дают развитие прохождением решений по обеспечению качества АСВН (рис. 2) [13–14].

⁷ Распространённые средства автоматизации деятельности предприятий ОПК: ERP — системы планирования и управления ресурсами предприятия; PDM — системы управления проектными данными и данными об изделии; EDM — системы управления данными инженерных расчётов; EDMS — системы электронного документооборота и управления заданиями; IETM — системы разработки и поддержки электронной эксплуатационной документации; PM — система управления проектами; CAD/CAE/CAM/CAID — системы компьютерной поддержки соответственно проектирования, инженерных расчётов и моделирования, подготовки производства, промышленного дизайна и виртуальной реальности, а также офисные приложения.

Эти решения используются субъектами ЖЦ системы с тем, чтобы понимать и управлять рисками, связанными с реализацией каждой стадии ЖЦ АСВН ($R(o)$; $R(p)$; $R(i)$).

С учётом вышеизложенного, всю совокупность причинно-следственных связей, влияющих на качество АСВН можно отобразить с помощью диаграммы Исикавы (рис. 3), где проблемные вопросы представлены основной стрелкой. Факторы, которые нейтрализуют проблему, отображены стрелками, примыкающими к основной стрелке с левой стороны, а те, которые усугубляют проблему — с правой стороны [15].

Основными негативными факторами, влияющими на своевременное формирование обоснованных решений по обеспечению качества АСВН являются:

- отсутствие оперативных способов сбора и обработки достоверной информации по постоянно проявляющимся несоответствиям характеристик качества АСВН;
- отсутствие объективных способов выявления причин возникших несоответствий и единого подхода к их фиксации и классификации этих несоответствий;
- разный уровень компетенций должностных лиц, участвующих в сборе и обработке информации, формировании и принятии решений;
- разный уровень конфиденциальности собираемых и обрабатываемых данных;
- отсутствие оптимальных способов взаимодействия субъектов ЖЦ АСВН и территориальная удалённость комплексов средств автоматизации (КСА) АСВН;
- множество договорных отношений несогласованных с требованиями нормативно-правовых актов и постоянно меняющимися коммерческими интересами субъектов ЖЦ АСВН.

Рассмотренные факторы не позволяют оперативно обеспечить необходимый уровень качества АСВН, а также:

- обосновывать мероприятия по восстановлению и модернизации КСА и их компонентов, совершенствованию процесса их эксплуатации, и уточнению установ-

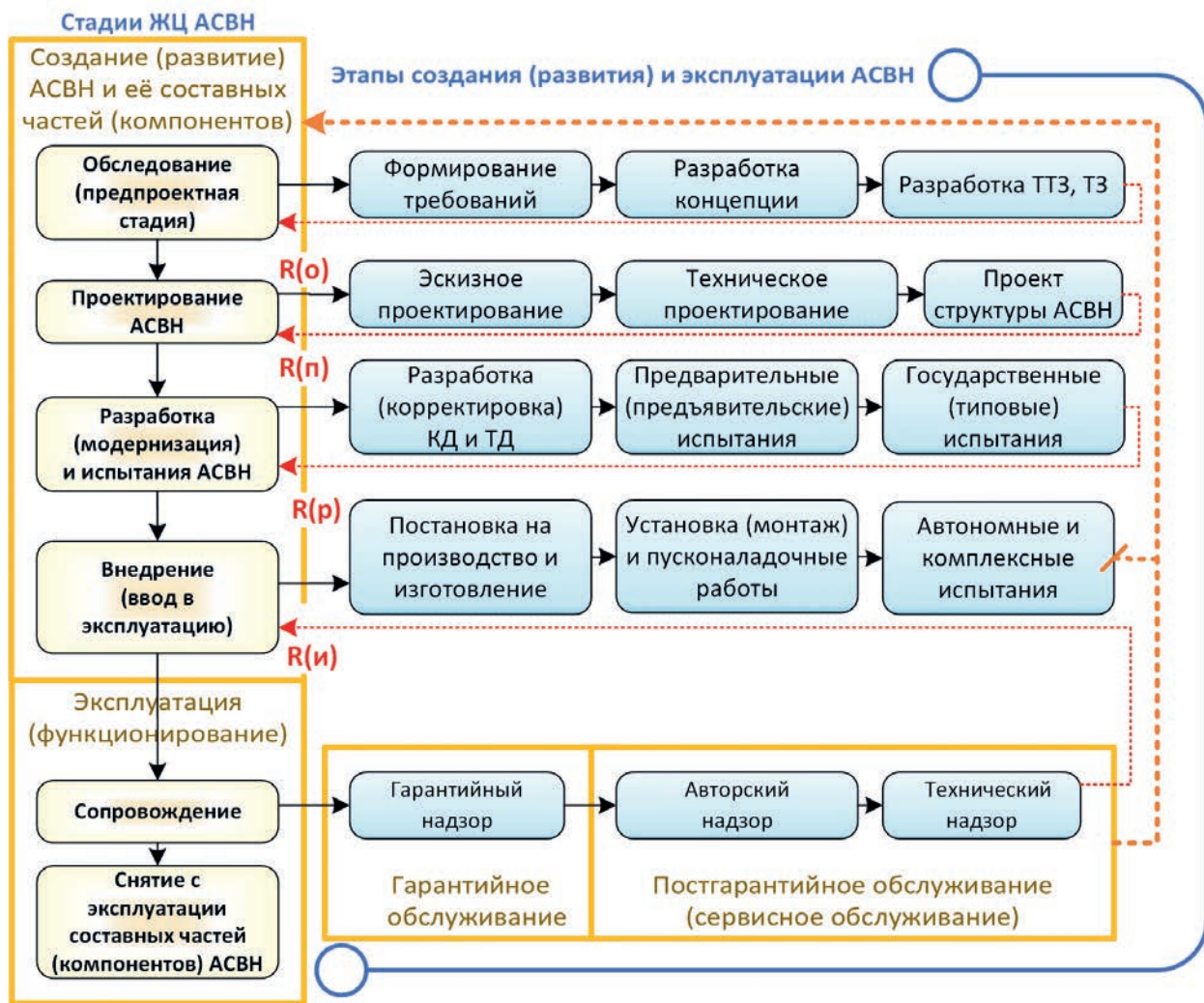


Рис. 2. Модель жизненного цикла АСВН

ленной номенклатуры комплекта запасных частей, инструмента, принадлежностей (ЗИП);

- прогнозировать необходимый объем и тип резервируемых комплектующих изделий для формирования страховых запасов⁸ на предприятиях ОПК и последующего пополнения ЗИП, особенно быстро устаревающих комплектующих иностранного производства (изготовление которых существенно зависит от конъюнктуры рынка);
- корректно формировать мероприятия государственного оборонного заказа в части авторского и технического надзоров, сервисного обслуживания и модернизации изделий.

С целью минимизации влияния основных негативных факторов, наиболее рациональным представляется

⁸ Пренебрежение требованиями Федерального закона от 03.07.2016 N317-ФЗ «О государственном оборонном заказе» в части некорректного формирования запаса продукции и комплектующих изделий, необходимых для выполнения государственного оборонного заказа в период послепродажного обслуживания, влечёт административную ответственность головного исполнителя.

путь включения в состав АСВН интегрированной информационно-аналитической системы обеспечения качества (ИАСОК), в виде совокупности средств и методов сбора, обработки и анализа задокументированной информации субъектами ЖЦ АСВН участвующими в формировании решений по обеспечению качества АСВН в процессе её функционирования и развития.

Основной функциональной задачей такой системы будет являться повышение эффективности информационно-аналитической деятельности субъектов ЖЦ в части обеспечения качества эксплуатируемых АСВН и своевременного формирования на их основе комплексной аналитической информации, необходимой для выработки решений, влияющих на характеристики качества АСВН с учётом стадий её ЖЦ (рис. 4).

Функционирование ИАСОК обеспечит оперативное воздействие на качество АСВН через её СУК за счёт автоматизации процессов информационно-аналитической

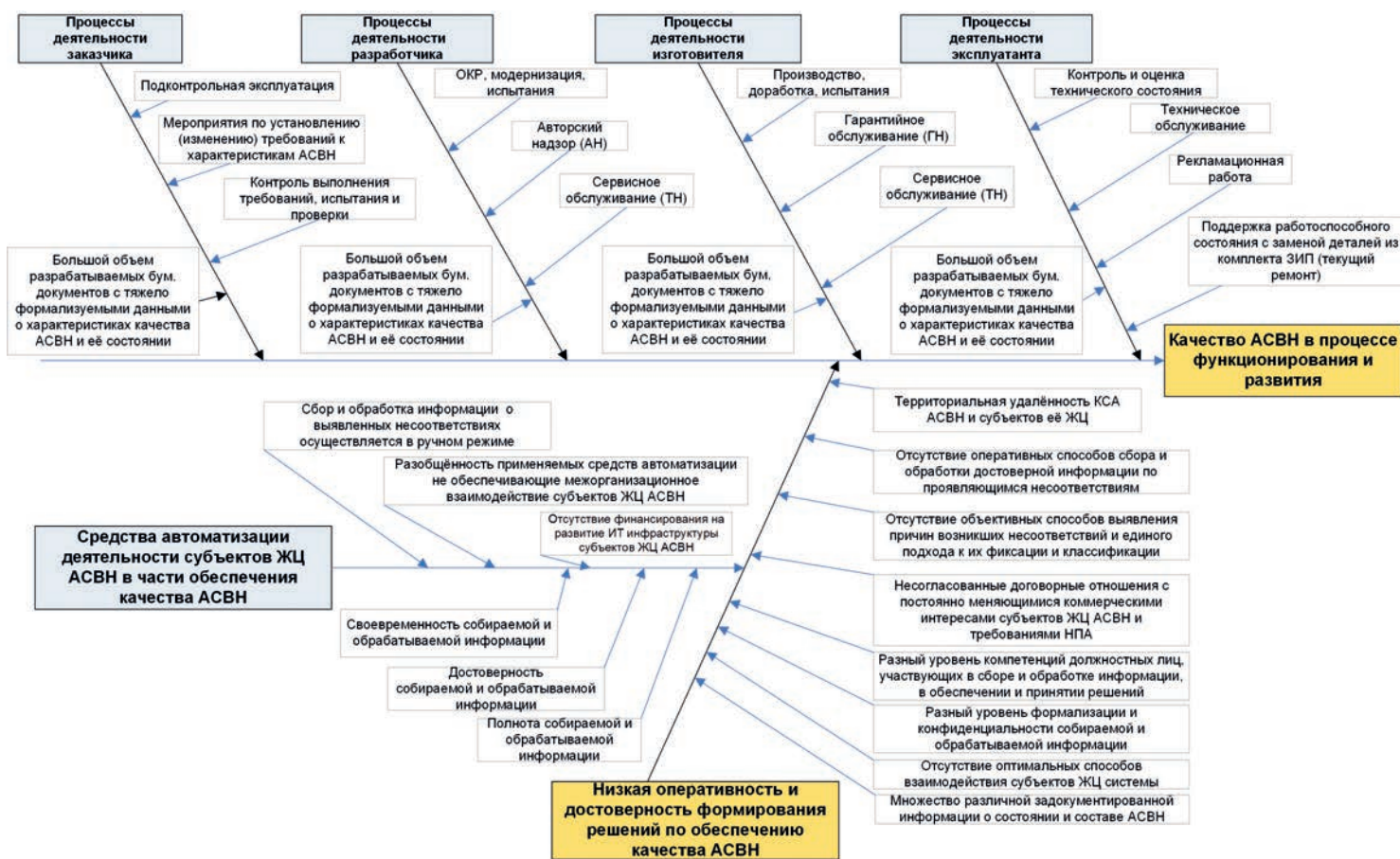


Рис. 3. Факторы, влияющие на качество АСВН в процессе функционирования и развития

деятельности субъектов ЖЦ АСВН (ИАД), совокупность которых характеризует всю информационно-аналитическую деятельность субъектов ЖЦ АСВН в части выработки решений, влияющих на характеристики качества АСВН. Процесс ИАД характеризуется продолжительностью и количеством операций (действий) выполняемых должностным лицом субъекта ЖЦ АСВН, что позволяет представить его в виде алгоритма реализации действий, продолжительность и количество которых зависит от применяемых средств автоматизации ИАД субъектов ЖЦ АСВН.

Для наглядности, представим вариант обобщённого процесса формирования решений по обеспечению качества АСВН на стадии её эксплуатации в виде функциональной модели без привязки к субъектам ЖЦ АСВН (рис. 5), из которой видно, что формирование решений по обеспечению качества АСВН является сложным и динамически изменяющимся процессом.

Стоит отметить, что при обосновании решений по обеспечению качества АСВН учитываются факторы неопределённости и риски, связанные с состоянием характеристик качества АСВН и изменением (уточнением) требований к ним, а также временные и стоимостные параметры этапов ЖЦ АСВН. На практике процесс последовательного снятия неопределённости (обоснования решений по обеспечению качества АСВН) состоит в разработке (корректировке) и анализе множества задокументированной информации, которые можно классифицировать на соответствующие виды документов (информационно-справочные документы, организационно-распорядительные документы, конструкторско-технологические документы) [12]. Соответственно, процессы формирования решений по обеспечению качества АСВН напрямую связаны с процессами информационно-аналитической деятельности по обработке и анализу различных видов документов разрабатываемых при обосновании того или иного решения.



Рис. 4. Место ИАСОК в процессе деятельности субъектов ЖЦ АСВН в СУК

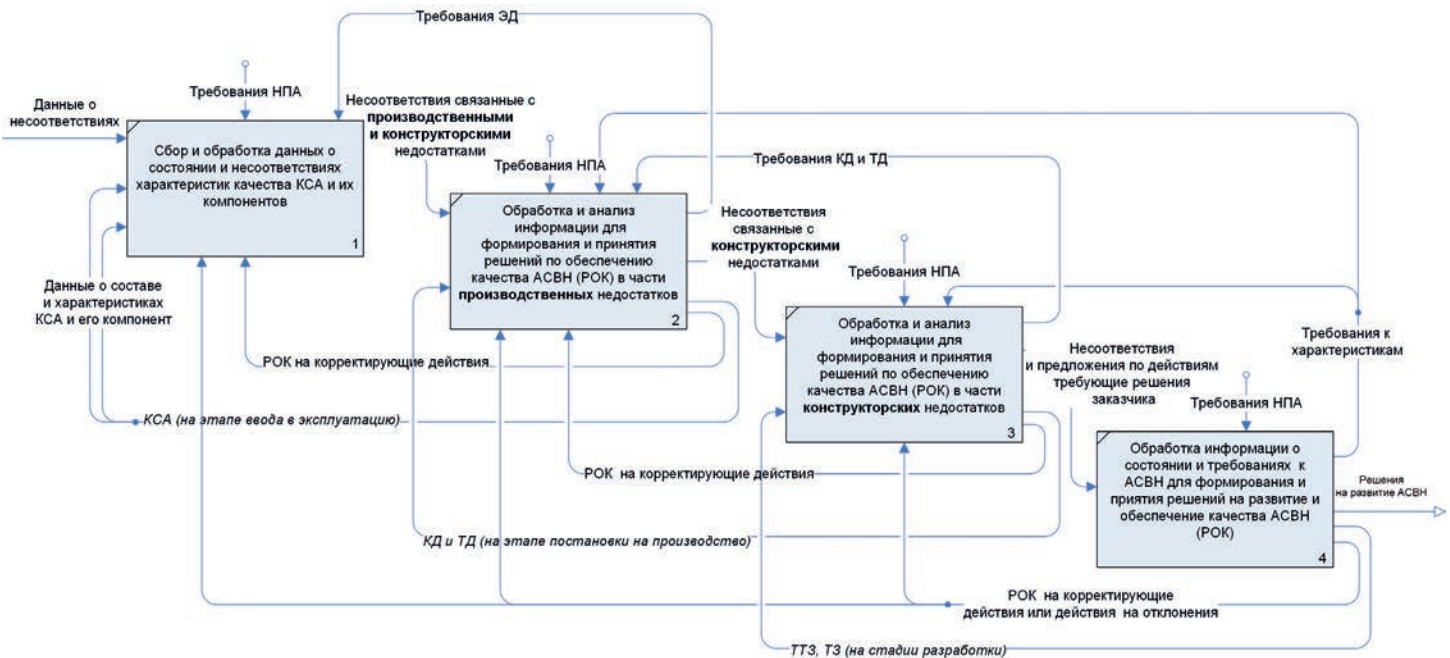


Рис. 5. Модель обобщённого процесса формирования решений по обеспечению качества АСВН

Это позволяет утверждать, что своевременное принятие решений по обеспечению качества АСВН, адекватных состоянию АСВН на соответствующем этапе ЖЦ, возможно только при автоматизации процессов информационно-аналитической деятельности субъектов ЖЦ АСВН средствами ИАСОК, компоненты которой должны быть интегрированы в состав КСА деятельности субъектов ЖЦ АСВН, при этом учитывать специфику и режимы их функционирования с учётом всех видов её обеспечения.

Обобщая вышеизложенное необходимо отметить, что создание ИАСОК позволит реализовать единую информационную среду обеспечивающую информационную поддержку экспертной деятельности всех субъектов ЖЦ АСВН, что позволит своевременно формировать обоснованные решения по обеспечению качества АСВН в процессе её функционирования и развития. При этом все процессы информационного взаимодействия имеют своей конечной целью исключение из деловой практики субъектов ЖЦ АСВН традиционного бумажного документооборота и переход к прямому электронному обмену информацией с обязательной привязкой всех проявляющихся несоответствий АСВН и её компонентов к информационной модели состояния АСВН. Такой подход позволит не только своевременно формировать решения по обеспечению качества АСВН, но и оперативно вырабатывать управляющие воздействия и синтезировать план корректирующих действий с возможностью сравнивать и накапливать причинно-следственные связи выявленных несоответствий и принятых ранее по ним решениям.

Литература

1. *Кравченко А. Г.* Проблемы качества в философии. Минск: Наука и техника, 1971. 224 с.
2. *Латидкс В. А.* Всеобщее качество (TQM) в российских компаниях. М.: Новости, 2002. 432 с.
3. *Коноплев С. П.* Управление качеством. М.: Инфра-М, 2015. 252 с.
4. *Сажин Ю. В., Плетнёва Н. П.* Аудит качества. М.: ДРОФА, 2014. 112 с.
5. *Фихман Ю. Н.* Система менеджмента качества на промышленном предприятии (по стандарту ИСО 9001:2000). М.: НТК «Трек», 2005. 216 с.
6. Пономарев О. Н. Формирование национальной системы управления качеством вооружения, военной и специальной техники // Сборник тезисов докладов участников I всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Инновационные подходы к развитию ВВСТ» (Москва, 9–10 декабря 2010 г.). М., 2010. С. 47–52.
7. Отчет о составной части НИР «Мониторинг-К». Этап 2. Совершенствование методического аппарата мониторинга качества ВВСТ (ВВС и ВВКО) по результатам его эксплуатации ВВСТ в войсках. Тверь: Изд-во ВА ВКО, 2014. 195 с.
8. *Лясковский В. Л., Черваков О. В., Истомин В. В., Максименко Н. Д., Горелов В. И., Кравченко А. Ю., Дудь А. П., Антонюк А. В., Заворухин Г. В.* Основы проектирования и эксплуатации автоматизированных систем управления военного назначения. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. 188 с.
9. *Панов М. М.* Оценка деятельности и система управления компанией на основе КРП. М.: Инфра-М, 2013. 255 с.
10. *Лясковский В. Л.* Системотехнические основы автоматизации процессов обработки информации и управления в иерархических системах военного назначения: Монография. Тверь: Изд-во ВА ВКО, 2014. 244 с.
11. *Говоритель В. В.* Порядок создания автоматизированных информационных систем // Стандарты и качество. 2018. № 12. С. 13–17.
12. *Говоритель В. В., Пушина А. А.* Предложения по разработке информационно-аналитической системы управления жизненным циклом АСУ военного назначения // Материалы VIII международной научной конференции «Технические и технологические системы» (Краснодар, 24–26 ноября 2016 г.). Краснодар, 2016. С. 134–139.
13. *Говоритель В. В.* Анализ международных стандартов по оценке качества систем и программного обеспечения применительно к стадиям жизненного цикла автоматизированных систем военного назначения // Качество и жизнь. 2018. № 2. С. 42–45.
14. *Лясковский В. Л., Говоритель В. В.* К вопросу применения международных стандартов при оценке качества автоматизированных систем военного назначения // Сборник научно-методических трудов II Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы развития вооружения, военной и специальной техники войск противовоздушной и противоракетной обороны, космических войск Воздушно-космических сил» (Москва, 21 апреля 2017 г.). Москва, 2017. С. 229–232.
15. *Исикова К.* Японские методы управления качеством / Под. ред. А. В. Гличеева. М.: Экономика, 1988. 214 с.



THE PROBLEM OF QUALITY ASSURANCE OF AUTOMATED MILITARY ASSIGNMENT SYSTEMS AND THEIR SOLUTIONS

VLADIMIR V. GOVORITEL,
Tver, Russia, govoritel@mail.ru

KEYWORDS: automated military system; information system; automation tools; quality; specifications; life cycle.

ABSTRACT

The work presents topical issues of ensuring the quality of operation and development of automated military systems with a detailed consideration of factors affecting the quality characteristics of automated military systems and the necessary measures related to the formation of solutions to ensure the quality of an automated military system and its components. The experience of the implementation of the considered measures brings uncertainty with hard-to-predict and regularly manifested inconsistencies in the form of deviations from the established requirements on permissible values of the values characterizing the quality of the used automated military system. Processing and analysis of the identified inconsistencies is carried out by the subjects of the life cycle of an automated military system in manual mode, without the use of automation tools, which leads to significant labor costs at each stage of the life cycle of this automated military system, and also affects the timeliness, completeness and accuracy of the processed information about constantly evolving discrepancies in the quality characteristics of an automated military system during its functioning and development. The solution to this problem is seen in the creation of an integrated information-analytical system for ensuring the quality of an automated military system based on information support technology for the life cycle of product samples. Creation and operation of this system will allow to realize a unified information environment providing information support for expert-analytical activities of all subjects of the life cycle of an automated military system and the timely formation on its basis of comprehensive analytical information necessary to develop solutions affecting the quality characteristics of an automated military system in the process its functioning and development.

REFERENCES

1. Kravchenko A.G. *Problemy kachestva v filosofii* [Quality problems in philosophy]. Minsk: Nauka i tekhnika, 1971. 224 p. (In Russian)
2. Lapidks V.A. *Vseobshchee kachestvo (TQM) v rossijskikh kompaniyakh* [Universal quality (TQM) in Russian companies]. Moscow: Hovosti, 2002. 432 p. (In Russian)
3. Konoplev S.P. *Upravlenie kachestvom* [Quality management]. Moscow: Infra-M, 2015. 252 p. (In Russian)
4. Sazhin Yu.V., Pletneva N.P. *Audit kachestva* [Quality audit]. Moscow: DROFA, 2014. 112 p. (In Russian)
5. Fikhman Yu.N. *Sistema menedzhmenta kachestva na promysh-*

6. *lennom predpriyatii (po standartu ISO 9001:2000)* [Quality management system at an industrial enterprise (according to ISO 9001:2000)]. Moscow: NTK "Track", 2005. 216 p. (In Russian)
6. Ponomarev O.N. *Formirovanie natsional'noy sistemy upravleniya kachestvom vooruzheniya, voennoy i spetsial'noy tekhniki* [Formation of the national quality management system of the IST]. *Sbornik tezisev dokladov uchastnikov I vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov «Innovatsionnye podkhody k razvitiyu VVST»* [Collection of theses of the reports of the participants of the 1st All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Specialists "Innovative Approaches to the Development of IST", Moscow, 9-10 December 2010]. Moscow, 2010. Pp. 47-52. (In Russian)
7. *Otchet o sostavnoj chasti NIR "Monitoring-K". Jetap 2. Sovershenstvovanie metodicheskogo apparata monitoringa kachestva VVST (VVS i VVKO) po rezul'tatam ego jekspluatatsii VVST v voyskakh* [Report on the integral part of the Research-Monitoring "K". Stage 2. Improvement of the methodological apparatus for monitoring the quality of the VVST (VVS and VVKO) as a result of its exploitation of VVST in the army]. Tver: Voennaya akademiya vozdushno-kosmicheskoy oborony imeni Marshala Sovetskogo Soyuza G.K. Zhukova Publ., 2014. 195 p. (In Russian)
8. Lyaskovsky V.L., Chervakov OV, Istomin V.V., Maksimenko N.D., Gorelov V.I., Kravchenko A. Yu., Dud A.P., Antonyuk A.V., Zavoruev G.V. *Osnovy proektirovaniya i jekspluatatsii avtomatizirovannykh sistem upravleniya voennogo naznacheniya* [Fundamentals of design and operation of automated control systems for military purposes]. Moscow: MSTU. N.E. Bauman Publ., 2016. 188 p. (In Russian)
9. Panov M.M. *Otsenka deyatel'nosti i sistema upravleniya kompaniej na osnove KPI* [Evaluation of activity and KPI-based company management system]. Moscow: Infra-M, 2013. 255 p. (In Russian)
10. Lyaskovsky V.L. *Sistemotekhnicheskie osnovy avtomatizatsii protsessov obrabotki informatsii i upravleniya v ierarkhicheskikh sistemakh voennogo naznacheniya: Monografiya* [System-based fundamentals of automating information processing and control in hierarchical military systems: Monograph]. Tver: Voennaya akademiya vozdushno-kosmicheskoy oborony imeni Marshala Sovetskogo Soyuza G.K. Zhukova Publ., 2014. 244 p. (In Russian)
11. Govoritel V.V. The order of creation of automated information systems. *Standards and quality*. 2018. No. 12. Pp. 13-17. (In Russian)
12. Govoritel V.V., Pushina A.A. *Predlozheniya po razrabotke infor-*

matsionno-analiticheskoy sistemy upravleniya zhiznennym tsiklom ASU voennogo naznacheniya [Proposals for the development of an information-analytical life-cycle management system for military-purpose automated control systems]. *Materialy VIII mezhdunarodnoj nauchnoj konferentsii "Tekhnicheskie i tekhnologicheskie sistemy"* [Proceedings of the VIII International Scientific Conference "Technical and Technological Systems", Krasnodar, 24-26 November 2016]. Krasnodar, 2016. Pp. 134-139. (In Russian)

13. Govoritel V.V. The analysis of the International standards in relation to assessment of characteristics of the automated military system's quality. *Kachestvo i zhizn'* [Quality and life]. 2018. No. 2. Pp. 42-45. (In Russian)

14. Lyaskovsky V.L., Govoritel V.V. K voprosu primeneniya mezhdunarodnykh standartov pri otsenke kachestva avtomatizirovannykh sistem voennogo naznacheniya [To a question of application of the international standards at assessment of the automated military

system's quality]. *Sbornik nauchno-metodicheskikh trudov II Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii "Aktual'nye voprosy razvitiya vooruzheniya, voennoj i spetsial'noj tekhniki vojsk protivovozdushnoj i protivoraketnoj oborony, kosmicheskikh vojsk Vozdushno-kosmicheskikh sil"* [Proceedings of the II of the All-Russian scientific and practical conference "Topical issues of development of arms, military and special equipment of troops of air and missile defense, space troops of Aerospace forces", Moscow, 21 april 2017]. Moscow, 2017. Pp. 229-232. (In Russian)

15. Isikova K. *Yaponskie metody upravleniya kachestvom* [Japanese methods of quality management]. Ed. A.V. Glicheev. Moscow: Economy, 1988. 214 p. (In Russian)

INFORMATION ABOUT AUTHOR:

Govoritel V. V., PhD, Doctoral Candidate of The Marshal of the Soviet Union G. K. Zhukov Air and Space Defense Military Academy.

For citation: Govoritel V. V. The problem of quality assurance of automated military assignment systems and their solutions. *H&ES Research*. 2019. Vol. 11. No. 2. Pp. 64-72. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10260 (In Russian)



НПЦ ИРС

Научно-производственный центр
Информационных региональных систем

▶ npcirs.ru

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

Основными направлениями нашей деятельности являются:

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

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

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



НПЦ ИРС

Научно-производственный центр
Информационных региональных систем

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



doi: 10.24411/2409-5419-2018-10261

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТАРГЕТИРОВАННОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ АТАКИ

КОЦЫНЯК

Михаил Антонович¹

ЛАУТА

Олег Сергеевич²

ИВАНОВ

Денис Александрович³

АННОТАЦИЯ

Описаны теоретические основы обоснования структуры таргетированной кибернетической атаки на элементы информационно-телекоммуникационной сети. Для этого проведен анализ существующих воздействий таргетированной кибернетической атаки, рассмотрена возможная структура воздействия таргетированной кибернетической атаки на информационно-телекоммуникационные сети, а также обоснован выбор логико-вероятностного метода оценки опасности таргетированной кибернетической атаки, позволяющий прогнозировать распределение этапов таргетированной кибернетической атаки по элементам, с учётом места и роли элементов в информационно-телекоммуникационной сети, а также получить исходные данные для оценки показателей, характеризующие эффективность устойчивости сети и обосновать соответствующие требования. В работе для оценки опасности этапов таргетированной кибернетической атаки предложено использовать метод анализа иерархий. На основе анализа этапов таргетированных кибернетических атак, их целей, способов реализации и элементов, на которые они направлены, построена иерархия их воздействия на информационно-телекоммуникационную сеть. Путем попарного сравнения определены числовые значения степени опасности этапов таргетированных кибернетических атак. Для оптимального распределения разноэффективных этапов таргетированной кибернетической атаки по взаимозависимым, с различной степенью важности, субэлементам информационно-телекоммуникационной сети с учетом вида целевой функции и ограничений, условий решения задачи в статье предложено использовать метод двух функций. С помощью разработанной модели таргетированной кибернетической атаки на информационно-телекоммуникационные сети в статье определены динамические коэффициенты важности и связности субэлементов информационно-телекоммуникационной сети, а также вероятность воздействия этапов таргетированной кибернетической атаки на них. Вычисленная вероятность воздействия таргетированной кибернетической атаки позволяет формировать исходные данные для принятия мер по защите информационно-телекоммуникационной сети от таргетированной кибернетической атаки. Для уменьшения опасности реализации таргетированной кибернетической атаки требуется принимать меры, ограничивающие использование злоумышленником уязвимостей информационно-телекоммуникационных сетей. При этом возникает необходимость выбора рациональной структуры информационно-телекоммуникационной сети и системы ее защиты, нейтрализующей сильные стороны таргетированной кибернетической атаки. Теоретический вклад статьи заключается в дальнейшем развитии методов нелинейного программирования, а также в их применении для оценки устойчивости информационно-телекоммуникационной сети в условиях таргетированной кибернетической атаки и выработке мер по противодействию им.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: защита элементов информационно-телекоммуникационной сети; этапы воздействия таргетированной кибернетической атаки; метод анализа иерархии; прогнозирование.

Сведения об авторах:

¹д.т.н., профессор, профессор Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия, koc-1942@mail.ru

²к.т.н., преподаватель кафедры Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия, laos-82@yandex.ru

³адъюнкт Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия, prosto_deniss@mail.ru

Основной тенденцией последних лет является смещение акцента с массовых атак на таргетированные, или целевые, которые заранее спланированы для воздействия на конкретную государственную или негосударственную структуру. Целевая атака всегда строится под объект воздействия, являясь продуманной операцией, а не простым техническим действием. Высокая сложность их обнаружения и колоссальный урон от их действий, которые не будут обнаружены спустя длительный срок [1].

Таргетированная (целевая) кибернетическая атака (ТКА) на элемент информационно-телекоммуникационной сети (ИТКС) реализуется в виде проведения комплекса мероприятий по изучению информационной системы и программного обеспечения [4]. На основе этого выявляются слабые места в структуре ИТКС, разрабатывается техника скрытого внедрения и обхода стандартных средств защиты информации, осуществляется закрепление внутри инфраструктуры, распространяется и выполняется вредоносное действие.

Результатом воздействия ТКА является внедрение ложной информации, нарушение установленных регламентов сбора, обработки и передачи информации в автоматизированных системах управления, отказы, сбои в работе ИТКС, а также компрометация передаваемой (получаемой) информации.

Таргетированная кибернетическая атака на ИТКС реализуется в виде несанкционированного, активного

процесса в инфраструктуре сети, удаленно управляемая в реальном масштабе времени, с целью нарушения или снижения эффективности выполнения технологических циклов ней.

В условиях воздействия ТКА довольно затруднительно выбрать способы и средства защиты ИТКС, так как их ресурс ограничен. Одним из путей разрешения этой проблемы является дифференцированный подход к защите ИТКС и ее элементов, который заключается в выборе наиболее актуальных для сложившейся обстановки направлений защиты. Для обоснования направлений защиты ИТКС и ее элементов, асимметричным возможностям ТКА, необходимо разработать математическую модель ТКА (рис. 1).

Целью модели является прогнозирование распределения этапов ТКА с учётом места и роли элементов в ИТКС, прогнозирована структура ТКА с учетом распределения её по элементам ИТКС в зависимости от их важности и связности, определена очерёдность воздействия на элементы ИТКС что, в свою очередь, позволит формировать исходные данные для принятия мер защиты элементов и ИТКС в целом [2].

Модель предназначена для обоснования принятия решений по защите элементов ИТКС от ТКА должностными лицами на этапах формирования, развёртывания и функционирования ИТКС. Структура модели представлена на рисунке 1.



Рис. 1. Структура математической модели ТКА

Основными этапами воздействия ТКА является:

- 1) поиск (сетевого сканирования);
- 2) создание стенда воздействия;
- 3) обход стандартных средств защиты;
- 4) поиск (сетевого сканирования);
- 5) разработки набора инструментов;
- 6) закрепление внутри инфраструктуры;
- 7) распределение;
- 8) пополнение;
- 9) мониторинг и выбор метода достижения цели.

Анализ данных этапов ТКА (табл. 1) позволяет сделать вывод о месте их проявления в ИТКС (рис. 2).

Анализ этапов ТКА и материалов по видам воздействий показывает, что воздействия на элементы ИТКС осуществляется как непосредственно на объекте, так и через транспортную сеть ИТКС. Общий характер проявления этапов ТКА на элементах ИТКС позволяет сделать вывод о том, что защита ИТКС от ТКА должна реализовываться

в 2-х направлениях: защита транспортной сети, а также объектовая защита [11].

В настоящее время решение данной проблемы вызывает некоторое затруднение, связанное с недостаточной разработкой соответствующего методического аппарата. Поэтому для оценки опасности этапов ТКА для ИТКС предлагается использовать метод анализа иерархий (МАИ) [9].

Определим показатель опасности ТКА для ИТКС с помощью МАИ.

Первым этапом применения МАИ является декомпозиция задачи выбора с использованием иерархии (рис. 3). В простейшем виде иерархия строится с вершины (цели) через промежуточные уровни-критерии (технично-экономические параметры) к самому нижнему уровню, который в общем случае является набором альтернатив.

Далее строится матрица сравнений степени опасности этапов ТКА относительно направленности их воздействия [3].

Таблица 1

Воздействие этапов ТКА на элементы ИТКС

Этапы реализации ТКА	Способы реализации	Область проявления
I. Поиск (сетевое сканирование)	1.1. Анализ сетевого трафика	Канал связи
	1.2. Сканирование сети и её уязвимостей	Коммутатор, Маршрутизатор, ПЭВМ, Серверы
	1.3. Сканирование протоколов передачи данных сети	
II. Создание стенда воздействий	2.1. Виртуальный	
	2.2. Аналитический	
	2.3. Имитационный	
III. Обход стандартных средств защиты	3.1. Обфускация модулей (вирусных сигнатур) с целью маскировки от антивирусов	Коммутатор Маршрутизатор ПЭВМ
	3.2. Выявление уязвимостей испытуемой системы	
	3.3. Инжектирование процесса (пост-эксплуатация)	
	3.4. Эксплуатация системы	
	3.5. Внедрение вирусных сигнатур в систему	
IV. Разработка набора инструментов	4.1. Средства создания инструментов воздействия	Коммутатор, Маршрутизатор, ПЭВМ Серверы
	4.2. Тело вируса Payload	ПЭВМ
V. Закрепление внутри инфраструктуры	5.1. Инструменты эксплуатации	Коммутатор, Маршрутизатор, ПЭВМ Серверы
VI. Мониторинг и выбор метода достижения цели	6.1. Хищение, удаление и/или искажение информации	ПЭВМ, Серверы
	6.2 Отказ в обслуживании	Коммутатор, Маршрутизатор, ПЭВМ Серверы
	6.3 Перенаправление трафика	Маршрутизатор, ПЭВМ, Серверы

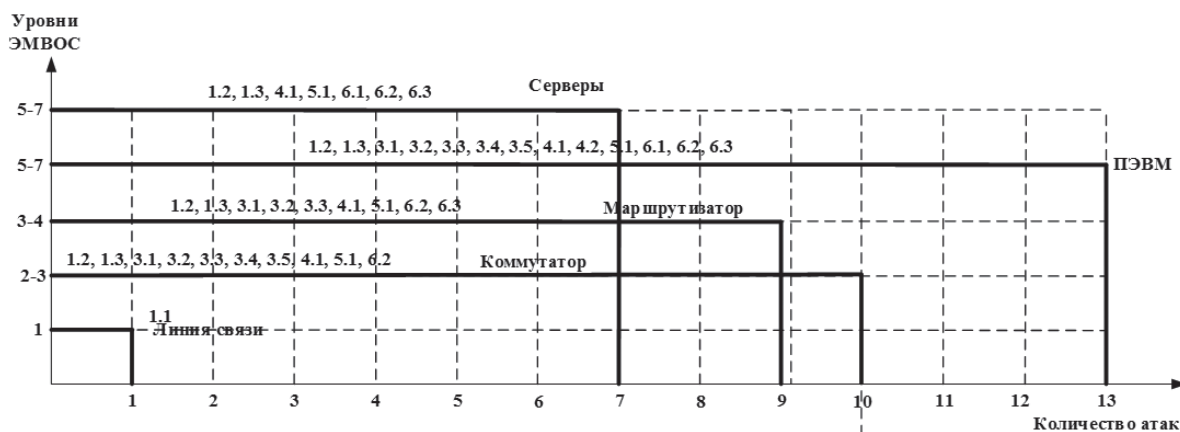


Рис. 2. Места проявления этапов ТКА в ИТКС

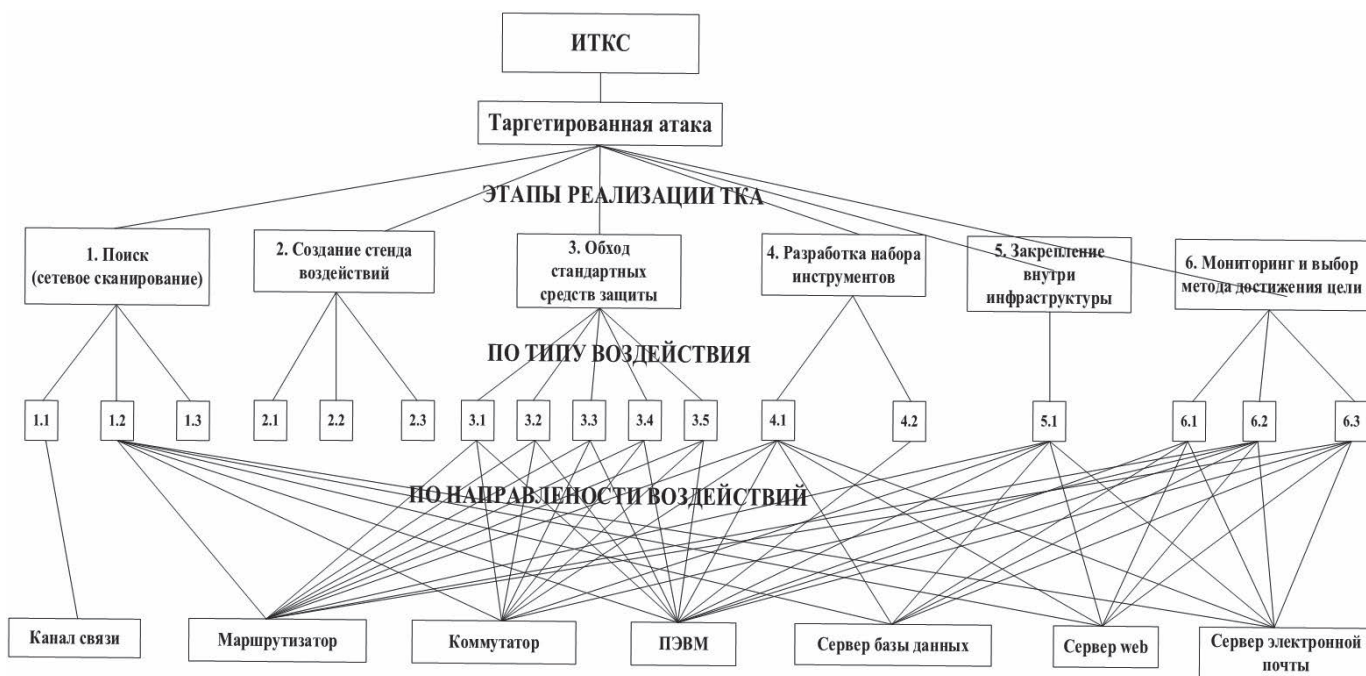


Рис. 3. Иерархия задачи воздействия ТКА на элементы ИТКС

Результатом оценки воздействия на ИТКС будет матрица назначений ТКА противника на элементы ИТКС, а также очередность воздействия на них.

В основу модели положено определение степени опасности ТКА, для чего необходимо рассмотреть физические основы отдельных ТКА, особенности их воздействия, характер проявления на элементах ИТКС [8–10].

Учитывая, что этапы ТКА воздействуют последовательно друг за другом, возможности по воздействию на i -й субэлемент ИТКС можно определить из выражения

$$P_{\text{возд},j} = 1 - \prod_{n=1}^N (1 - P_{\text{возд},nj}). \quad (1)$$

Информационно-телекоммуникационная сеть является сложной системой, содержащей S взаимосвязанных субэлементов. Каждый j -й субэлемент ИТКС характеризуется своими решаемыми задачами в информационном обмене (формирование, распределение и передача потоков сообщений). Поэтому априорную ценность j -го субэлемента ИТКС для этапов ТКА обозначим коэффициентом

важности $A = \{A_j\}, j = \overline{1, S}$, характеризующим контраст j -го субэлемента ИТКС по отношению к другим субэлементам ИТКС:

$$A_j = \begin{cases} \frac{N^A - N_j^A}{N^A} & \text{— важность } j\text{-го субэлемента в элементе ИТКС;} \\ \frac{(S - K_j)}{S} & \text{— важность } j\text{-го субэлемента в ИТКС;} \end{cases} \quad (2)$$

$$0 < A_j(\tau_{\text{возд.}}) \leq T;$$

где N_j^A — количество субэлементов j -го типа в элементе ИТКС;

N^A — общее количество субэлементов в элементе ИТКС;

K_j — количество субэлементов j -го типа в ИТКС;

S — общее количество субэлементов в ИТКС.

С учётом этого можно записать

$$P_{\text{возд.}(S)} = \max_v \sum_{j=1}^S A_j (1 - \prod_{v=1}^Y (1 - P_{\text{возд.}jv})), j = \overline{1, S}. \quad (3)$$

Очевидно, что коэффициент важности A_j j -го субэлемента ИТКС для этапов ТКА зависит от периодичности обновления разведывательной информации. Поэтому динамику изменения обстановки учтём динамическим коэффициентом важности

$$A_j(\tau) = A_j \exp^{-\frac{t}{\bar{\tau}}}, \quad (4)$$

где A_j — коэффициент важности j -го субэлемента ИТКС для этапов ТКА;

t — время обновления разведывательной информации;

$\bar{\tau}_{\text{возд.}}$ — среднее значение цикла воздействия ТКА.

С точки зрения информационного обмена, ИТКС — совокупность элементов (маршрутизатор, коммутатор и т. д.) и их взаимосвязей. Функциональную взаимосвязь элементов в ходе информационного обмена учтём коэффициентом связности α_{ij}

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} \frac{\lambda^j}{\lambda_{\text{sum}}^i} & \text{— } j\text{-} \\ \frac{\lambda^i}{\lambda_{\text{sum}}^j} & \text{— } j\text{-} \end{cases}; \quad (5)$$

$$0 < \alpha_{ij} \leq 1,$$

где λ^j — интенсивность нагрузки j -го субэлемента маршрутизатора;

$\lambda_{\text{sum}}^j = \sum_{j=1}^S \lambda_{\text{sum}}^j$ — интенсивность нагрузки, обрабатываемой в ИТКС.

По условиям функционирования ИТКС примем три градации состояния: мирное время, период непосредственной угрозы агрессии, военное время. Состояние ИТКС и её элементов зависит от многих факторов, в т. ч. и от лица, принимающего решение. Структура ИТКС изменяется при переходе из состояния в состояние, число состояний конечно, и время их смены фиксировано [5–7]. Состояние ИТКС в пределах указанных градаций определяет структурную взаимосвязь элементов. В пределах каждого этапа функционирования процесс информационного обмена и его характеристики изменяются в зависимости от изменения информационной нагрузки в пределах временных интервалов этапов цикла управления. Это также определяет функциональную взаимосвязь элементов (в процессе информационного обмена), как динамическую характеристику ИТКС.

Функциональная взаимосвязь элементов сети в ходе информационного обмена зависит, в том числе, и от воздействия этапов ТКА на ИТКС, поэтому изменение во времени взаимосвязи элементов ИТКС учтём динамическим коэффициентом связности элементов ИТКС $\alpha_{ij}(\tau_{\text{возд.}})$:

$$\alpha_{ij}(\tau_{\text{возд.}}) = \alpha_{ij} \exp^{-\frac{t}{\bar{\tau}_{\text{возд.}}}}, \quad (6)$$

где α_{ij} — исходное значение коэффициента связности субэлементов ИТКС;

t — текущее время;

$\bar{\tau}_{\text{возд.}}$ — математическое ожидание длительности импульса потока совпадений (средняя продолжительность воздействия этапов ТКА на ИТКС).

Средняя продолжительность воздействия этапов ТКА на ИТКС определяется, как длительность $\tau_{\beta, k}$ импульса совпадений, образованного в результате перекрытия во времени заданного числа k импульсов независимых потоков β . Этапы ТКА на ИТКС, реакции ИТКС в условиях ТКА, работы системы восстановления ИТКС, характеризующей технико-эксплуатационную надёжность сети, то есть

$$\bar{\tau}_{\text{возд.}} = \left(\sum_{\beta=1}^{\beta} \frac{1}{\tau_{\beta\beta}} \right)^{-1} \quad (7)$$

где $\tau_{\beta\beta}$ — средняя продолжительность цикла β -го воздействия этапов ТКА на ИТКС.

С учётом этого, выражение, можно записать так

$$P_{\text{возд.}}(S) = \max_v \sum_{j=1}^S \left(A_j \exp^{-\frac{t}{\bar{\tau}_{\text{возд.}}}} \right) \times \left\{ 1 - \prod_{j=1}^S \left[1 - \left(\alpha_{ij} \exp^{-\frac{t}{\bar{\tau}_{\text{возд.}}}} \right) \left(1 - \prod_{v=1}^Y (1 - P_{\text{возд.}jv}) \right) \right] \right\}. \quad (8)$$

Таргетированная кибернетическая атака (этапы «Поиск (сетевое сканирование)», «Создание стенда воздействия» и д.р.) обладают различными предельными вероятностно-временными характеристиками воздействия. Это придаёт каждому этапу ТКА уникальные свойства, а, значит, они отличаются и степенью опасности для ИТКС. Следовательно, каждый этап ТКА характеризуется своим v -вектором $\{P_{\text{возд},jv}\}_S$ воздействия на элементы ИТКС ($j = 1, S$). Тогда возможности всех Y этапов ТКА по S субэлементам ИТКС можно задать матрицей $\|P_{\text{возд},jv}\|_{YS}$. Обозначим $E_{jv} = 1 - P_{\text{возд},jv}$ — степень защиты j -го субэлемента сети от v -й этапов ТКА, тогда выражение (8) можно записать так

$$0 \leq A_j, 0 < \alpha_{ij} \leq 1, 0 \leq E_{iv} \leq 1.$$

Таким образом, имеет место следующая физическая постановка задачи [12–14].

Информационно-телекоммуникационная сеть, включающая S субэлементов ($j = 1, S$), каждый из которых характеризуется динамическим коэффициентом важности $A_j(\tau_{\text{возд}}) = \{A_j(\tau_{\text{ТКА}})\}_S$, подвержена воздействию ТКА [15]. Если в результате воздействия ТКА j -ый субэлемент прекращает функционирование, то с вероятностью α_{ij} выходит из строя i -й субэлемент. Степень опасности ТКА задана матрицей $\|P_{\text{возд},jv}\|_{YS}$. Оценка информационного воздействия сводится к решению задачи по распределению

этапов ТКА по взаимосвязанным элементам ИТКС (динамический коэффициент связности $\alpha_{ij}(\tau_{\text{возд}})$ таким образом, чтобы число субэлементов, подверженных воздействию за заданное время, было максимальным.

Содержательная постановка задачи. Исходя из физической постановки задачи, требуется определить матрицу назначения этапов ТКА $X^0 = \|X_{jv}\|_{YS}$, обеспечивающую максимальное значение целевой функции

$$F(X^0) = \sum_{i=1}^S F_i(x_{vi}^0) = \max_X \sum_{i=1}^S A_i(\tau_{\text{оп}}) \cdot (1 - E_{vi}^{x_{vi}}). \quad (9)$$

где $E_{vi} = 1 - P_{\text{возд},vi}$ — вероятность защиты i -ого субэлемента ИТКС от v -ого этапа ТКА; $0 < A_i(\tau_{\text{оп}}) \leq 1$.

Степень опасности ТКА задана матрицей вероятности воздействия $\|P_{\text{возд},jv}\|$ (табл. 2), элементы которой получены с применением частных методик.

В результате решения задачи была определена очередность воздействия на элементы ИТКС и наиболее опасные этапы ТКА.

В первую очередь воздействие будут направлены на АРМ и маршрутизатор, а наиболее часто используемый этап ТКА является поиск (сетевое сканирование). Указанные результаты математической модели ТКА позволяют применить дифференцированный подход при выборе варианта защиты элементов ИТКС.

Таблица 2

Вероятность вскрытия элементов ИТКС

Тип объекта	Маршрутизатор						Коммутатор						АРМ, Сервер					
	0,93						0,78						0,92					
Важность объекта	0,93						0,78						0,92					
Вид воздействия	I этап	II этап	III этап	IV этап	V этап	VI этап	I этап	II этап	III этап	IV этап	V этап	VI этап	I этап	II этап	III этап	IV этап	V этап	VI этап
	Вероятность воздействия	0,71	0,51	0,52	0,58	0,61	0,68	0,73	0,38	0,41	0,33	0,24	0,22	0,52	0,61	0,68	0,65	0,71
Результаты решения задачи																		
1	0,66	0,47	0,48	0,53	0,56	0,63	0,67	0,29	0,31	0,25	0,18	0,17	0,47	0,56	0,62	0,59	0,65	0,67
2	0,19	0,47	0,48	0,53	0,56	0,63	0,08	0,29	0,31	0,25	0,18	0,17	0,47	0,56	0,62	0,59	0,65	0,18
3	0,19	0,47	0,48	0,53	0,56	0,21	0,08	0,29	0,19	0,25	0,18	0,17	0,47	0,56	0,62	0,59	0,19	0,18
4	0,19	0,47	0,48	0,53	0,22	0,21	0,08	0,18	0,19	0,25	0,18	0,17	0,47	0,56	0,21	0,59	0,19	0,18
5	0,19	0,47	0,48	0,23	0,22	0,21	0,08	0,18	0,19	0,17	0,18	0,17	0,47	0,56	0,20	0,21	0,19	0,18
6	0,19	0,47	0,23	0,23	0,22	0,21	0,08	0,18	0,19	0,17	0,14	0,17	0,47	0,22	0,20	0,21	0,19	0,18



Литература

1. Коцыняк М.А., Иванов Д.А. Обеспечение безопасности управления роботизированных систем от воздействия таргетированных кибернетических атак // Тезисы докладов XVI Всероссийской научной конференции «Нейрокомпьютеры и их применение» (Москва, 13 марта 2018). М.: Изд-во ФГБОУ ВО МГППУ, 2018. С. 108-А.
2. Гудков М.А., Лаута О.С., Иванов Д.А., Соловьев Д.В. Применение методов искусственного интеллекта в задачах обеспечения информационной безопасности // Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции «Современные информационные технологии. Теория и практика» (Череповец, 04 декабря 2018 г.) / Отв. ред. Т.О. Петрова. Череповец: Изд-во Череповецкого государственного университета, 2018. С. 162–166.
3. Лаута О.С., Кузнецов С.И., Клишиов И.А., Смыгин А.М. Методика оценки компьютерных угроз на ИТКС // Сборник трудов XXIII Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж, 18–20 апреля 2017 г.). Воронеж: Вэлборн, 2017. Т. 3. С. 1200.
4. Коцыняк М.А., Дементьев В.Е., Тесля С.П., Лаута О.С. Методика прогнозирования протокольных воздействий на роботизированные системы // Региональная информатика и информационная безопасность: Сборник трудов. 2017. № 4. С. 105–107.
5. Коцыняк М.А., Иванов Д.А., Лаута О.С., Нечепуренко А.П., Муртазин И.Р. Методика прогнозирования воздействия таргетированной кибернетической атаки на информационно-телекоммуникационную сеть // Сборник трудов конференции «Региональная информатика и информационная безопасность». 2017. № 4. С. 109–111.
6. Иванов Д.А., Коцыняк М.А., Лаута О.С., Муртазин И.Р. Методика кибернетической устойчивости в условиях воздействия таргетированных кибернетических атак // Сборник научных статей VII Международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2018)» (Санкт-Петербург, 28 февраля-01 марта 2018 г.) / Под ред. С.В. Бачевского. СПб.: Изд-во СПб ГУТ, 2018. Т. 2. С. 343–346.
7. Карганов В.В., Драчев В.О., Левченко Г.Н. Формирование модели предметной области для информационной системы // Труды десятой общероссийской научно-практической конференции «Инновационные технологии и технические средства специального назначения» (Санкт-Петербург, 15–16 ноября 2018 г.). СПб.: Изд-во БГТУ Военмех им. Д.Ф. Устинова, 2018. С. 264–268.
8. Карганов В.В., Липатников В.А., Литвинов А.А. Распознавание вторжений и анализ динамики действий нарушителя при управлении информационно-вычислительной сетью // Материалы конференций ГНИИ «Нацразвитие» (Санкт-Петербург, 28–31 января 2018). СПб.: ГНИИ «Нацразвитие», 2018. С. 28–36.
9. Берзин Е.А. Оптимальное распределение. М.: Советское радио, 1974. 304 с.
10. Luvanda A., Kimani S., Kimwele M. Identifying Threats Associated With Man-In-The Middle Attacks during Communications between a Mobile Device and the Back End Server in Mobile Banking Applications // IOSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JCI). 2014. No. 12(2). Pp. 35–42.
11. Kelly F., Yudovina E. *Stochastic Networks*, Cambridge University Press, 2014. 234 p.
12. Saenko I., Laut O., Kotenko I. Analytical modeling of mobile banking attacks based on a stochastic network conversion technique // IT CoNvergence PRActice. 2016. Vol. 4. No. 4. Pp. 1–10.
13. OPNET Technologies, Inc. URL: <http://www.opnet.com/> (дата обращения: 13.10.2018)
14. Ahuja S.P. COMNET III: A Network Simulation Laboratory Environment for a Course in Communications Networks // Proceedings of the 28th Annual Frontiers in Education Conference (FIE '98), (Tempe, Arizona, 4–7 November 1998). ChamStipes Publishing L. L.C., 1998. Vol. 3. Pp. 1085–1088.
15. Kotenko I., Chechulin A. A Cyber Attack Modeling and Impact Assessment Framework // Proc. of the 5th IEEE International Conference on Cyber Conflict (CyCon) (Tallin, Estonia, 04–07 June 2013). IEEE, 2013. Pp. 1–24.



MATHEMATICAL MODEL OF TARGETED COMPUTER ATTACK

MIKHAIL A. KOTSYNYAK,

Russia, St. Petersburg, koc-1942@mail.ru

OLEG S. LAUTA,

Russia, St. Petersburg, laos-82@yandex.ru

DENIS A. IVANOV,

Russia, St. Petersburg, prosto_deniss@mail.ru

KEYWORDS: information and telecommunication network; targeted cybernetic attack; hierarchy analysis method; forecasting.

ABSTRACT

The theoretical foundations of substantiating the structure of a targeted cybernetic attack on ITX elements are described. To do this, an analysis of existing impacts of the targeted cybernetic attack was carried out, the possible structure of the targeted cybernetic attack impact on ITCS was considered, and the logical-probabilistic method for assessing the hazard of targeted cybernetic attack was justified, allowing to predict the distribution of targeted cybernetic attack stages among elements, taking into account the place and role of elements in the information and telecommunications network obtain baseline data for assessing indicators characterizing the effectiveness of network stability and substantiate relevant requirements. In the work, it is proposed to use the hierarchy analysis method for assessing the hazard of targeted cybernetic attack stages. Based on the analysis of the stages of the targeted cybernetic attack, their goals, methods of implementation and the elements to which they are directed, a hierarchy of their impact on ITCS is built. By pair-wise comparison, the numerical values of the degree of danger of the targeted cybernetic attack stages are determined. For the optimal distribution of differently effective stages of targeted cybernetic attack over interdependent, with varying degrees of importance, ITKS sub-elements, taking into account the type of the objective function and constraints, the conditions for solving the problem, the article suggests using the two-function method. With the help of the developed targeted cybernetic attack model on ITX, the article determined the dynamic coefficients of importance and connectivity of ITX sub-elements, as well as the probability of the impact of targeted cybernetic attack stages on them. The calculated probability of exposure to the targeted cybernetic attack allows you to form the initial data for taking measures to protect ITCS from the targeted cybernetic attack. To reduce the risk of implementing a targeted cybernetic attack, it is necessary to take measures that limit the exploitation of ITX vulnerabilities by an attacker. In this case, it becomes necessary to choose a rational structure of ITCS and its protection system, which neutralizes the strengths of the targeted cybernetic attack. The theoretical contribution of the article lies in the

further development of non-linear programming methods, as well as their application for assessing the stability of ITCS under targeted cybernetic attack conditions and the development of measures to counter them.

REFERENCES

1. Kotsynyak M.A., Ivanov D.A. Obespechenie bezopasnosti upravleniya robotizirovannykh sistem ot vozdeystviya targetirovannykh kiberneticheskikh atak [Ensuring the security of control of robotic systems from the effects of targeted cybernetic attacks]. *Tezisy dokladov XVI Vserossijskoj nauchnoj konferentsii «Nejrokomputery i ikh primenenie»* [Abstracts of reports of the XVI All-Russian Scientific Conference "Neurocomputers and their applications", Moscow, 13 march 2018]. Moscow: MSUPE Publ., 2018. P. 108-A. (In Russian)
2. Gudkov M.A., Lauta O.S., Ivanov D.A., Soloviev D.V. Primenenie metodov iskusstvennogo intellekta v zadachakh obespecheniya informatsionnoj bezopasnosti [The use of artificial intelligence methods in the tasks of ensuring information security]. *Materialy IV Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii "Sovremennye informatsionnye tekhnologii. Teoriya i praktika"* [Proceedings of the IV All-Russian Scientific Practical Conference "Modern information technologies. Theory and Practice", Cherepovets, 04 december 2018]. Ed. ed. T.O. Petrova. Cherepovets: Cherepovets State University Publ., 2018. Pp. 162-166. (In Russian)
3. Lauta O.S., Kuznetsov S.I., Klinshov I.A., Smygin A.M. Metodika otsenki komp'yuternykh ugroz na ITKS [Methods of assessing computer threats to ITX]. *Sbornik trudov XXIII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz"* [Proceedings of the XXIII International Scientific and Technical Conference "Radiolocation, navigation, communication", Voronezh, 18-20 april 2017]. In 3 vol. Voronezh: Vjelborn, 2017. Vol. 3. P. 1200. (In Russian)
4. Kotsynyak M.A., Dementiev V.E., Teslya S.P., Lauta O.S. Metodika prognozirovaniya protokol'nykh vozdeystvij na robotizirovannye sistemy [Methods of predicting protocol effects on robotic systems].



Regional'naya informatika i informatsionnaya bezopasnost': Sbornik trudov [Proceedings of the Conference "Regional informatics and information security"]. 2017. No. 4. Pp. 105-107. (In Russian)

5. Kotsynyak M.A., Ivanov D.A., Lauta O.S., Nechepurenko A.P., Murtazin I.R. Metodika prognozirovaniya vozdejstviya targetirovannoj kiberneticheskoj ataki na informatsionno-telekommunikatsionnyu set' [Methods of predicting the impact of a targeted cyber attack on an information and telecommunication network] *Sbornik trudov konferentsii "Regional'naya informatika i informatsionnaya bezopasnost'"* [Proceedings of the Conference "Regional informatics and information security"]. 2017. No. 4. Pp. 109-111. (In Russian)

6. Ivanov D.A., Kotsynyak M.A., Lauta O.S., Murtazin I.R. [Methodology of Cybernetic Sustainability under the influence of targeted cybernetic attacks]. *Sbornik nauchnykh statej VII Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy i nauchno-metodicheskoy konferentsii "Aktual'nye problemy infotelekkommunikatsij v nauke i obrazovanii (API-NO 2018)"* [Collection of scientific articles VII International Scientific-Technical and Scientific-Methodical Conference "Actual problems of information and telecommunications in science and education (APINO 2018)", St. Petersburg, 28 february-01 march 2018]. In 4 vol. Edited by S.V. Bachevsky. St. Petersburg: SPbSUT Publ., 2018. Vol. 2. Pp. 343-346. (In Russian)

7. Karganov V.V., Drachev V.O., Levchenko G.N. Formirovanie modeli predmetnoj oblasti dlya informatsionnoj sistemy [Formation of a domain model for an information system]. *Trudy desyatoj obshcherossijskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii "Innovatsionnye tekhnologii i tekhnicheskie sredstva spetsial'nogo naznacheniya"* [Proceedings of the tenth All-Russian Scientific and Practical Conference "Innovative technologies and technical means for special purposes", St. Petersburg, 15-16 November 2018]. St. Petersburg: BSTU "VOENMEH" Publ., 2018. Pp. 264-268. (In Russian)

8. Karganov V.V., Lipatnikov V.A., Litvinov A.A. Detection of Intrusion and Analysis of the Dynamics of the offender's actions in Managing the Information and Computing Network. *Materialy konferentsij GNII "Natsrazvitie"* [Proceedings of the State Research Institute of National Development, St. Petersburg, 28-31 january 2018]. St. Petersburg:

Gumanitarnyj natsional'nyj issledovatel'skij institut "Natsrazvitie" Publ., 2018. Pp. 28-36. (In Russian)

9. Berzin E.A. *Optimal'noe raspredelenie* [Optimal resource allocation and elements of system synthesis]. Moscow: Sovetskoe Radio, 1974. 304 p. (In Russian)

10. Luvanda A., Kimani S., Kimwele M. Identifying Threats Associated With Man-In-The Middle Attacks during Communications between a Mobile Device and the Back End Server in Mobile Banking Applications. *IOSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JCI)*. 2014. No. 12(2). Pp. 35-42.

11. Kelly F., Yudovina E. *Stochastic Networks*, Cambridge University Press, 2014. 234 p.

12. Saenko I., Lauta O., Kotenko I. Analytical modeling of mobile banking attacks based on a stochastic network conversion technique. *IT CoNvergence PRACTICE*. 2016. Vol. 4. No. 4. Pp. 1-10.

13. OPNET Technologies, Inc. URL: <http://www.opnet.com/> (date of access: 13.10.2018).

14. Ahuja S.P. COMNET III: A Network Simulation Laboratory Environment for A Course In Communications Networks. *Proceedings of the 28th Annual Frontiers in Education Conference (FIE '98)*, (Tempe, Arizona, 4-7 November 1998). ChamStipes Publishing L.L.C., 1998. Vol. 3. Pp. 1085-1088.

15. Kotenko I., Chechulin A. A Cyber Attack Modeling and Impact Assessment Framework. *Proc. of the 5th IEEE International Conference on Cyber Conflict (CyCon)* (Tallin, Estonia, 04-07 june 2013). IEEE, 2013. Pp. 1-24.

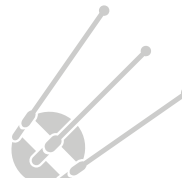
INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Kotsynyak M. A., PhD, Full Professor, Professor of the Military Academy of Communications of the Marshal of the Soviet Union S.M. Budennogo;

Lauta O. S., Ph.D., Teacher of the Department of the Military Academy of Communications of the Marshal of the Soviet Union S.M. Budennogo;

Ivanov D. A., Postgraduate student of the Military Academy of Communications of the Marshal of the Soviet Union S.M. Budennogo.

For citation: Kotsynyak M.A., Lauta O.S., Ivanov D.A. Mathematical model of targeted computer attack. *H&ES Research*. 2019. Vol. 11. No. 2. Pp. 73-81. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10261 (In Russian)





doi: 10.24411/2409-5419-2018-10262

МОДЕЛЬ РАЗГРАНИЧЕНИЯ ПРАВ ДОСТУПА ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

КУРАКИН

Александр Сергеевич¹

КОСТЫРЕВА

Александра Андреевна²

АННОТАЦИЯ

Современный этап развития общества характеризуется широким использованием информационных систем специального назначения, предназначенных для решения различных задач, например, задач государственного управления, управления войсками и оружием, экологически опасными и экономически важными производствами. В связи с важностью данных систем существует острая необходимость обеспечения их информационной безопасности, одним из главных аспектов которой является защита от несанкционированного доступа. В качестве меры защиты от несанкционированного доступа осуществляется разграничение доступа к информации разной степени конфиденциальности, при реализации которого не учитываются последствия от угроз утечки информации по техническим каналам вследствие побочных электромагнитных излучений и наводок. В целях нейтрализации упомянутых угроз безопасности предложена модель разграничения прав доступа на основе технологии «wavelength division multiplexing» и меток безопасности «basic security option». Показано, что использование меток безопасности позволяет проверять легитимность передачи информации через сетевые соединения, а также позволяет подтверждать, что маршрут передачи дейтаграммы защищён в соответствии со степенью конфиденциальности (секретности) передаваемых данных. Описан алгоритм защищенной передачи файла по информационной системе специального назначения. Приведен сценарий защищенного голосового вызова между оконечными устройствами, находящимися в разных сетевых сегментах информационной системы специального назначения. Предложенная модель разграничения прав доступа обеспечивает разграничение доступа к информации разной степени конфиденциальности в части решения задачи защиты информации от несанкционированного доступа с учетом исключения побочных электромагнитных излучений и наводок при ее передаче по оптическим каналам связи.

Сведения об авторах:

¹к.т.н., заместитель директора по технической защите информации общества с ограниченной ответственностью «Специальный технологический центр», г. Санкт-Петербург, Россия, niritit@gmail.com

²инженер-исследователь 2 категории акционерного общества «Технологии радиоконтроля», г. Санкт-Петербург, Россия, sandra-1995@yandex.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: информационная система специального назначения; метка безопасности; оптическое мультиплексирование с разделением по длине волны; побочные электромагнитные излучения и наводки; разграничение прав доступа; защита от несанкционированного доступа.

Для цитирования: Куракин А. С., Костырева А. А. Модель разграничения прав доступа для информационной системы специального назначения // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 2. С. 82-89. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10262



В настоящее время в силу существующих тенденций развития геополитической обстановки резко возрастает актуальность задач обеспечения информационной безопасности информационных систем специального назначения согласно изложенным в руководящих документах требованиям. Одним из ключевых вопросов обеспечения информационной безопасности указанных информационных систем является разграничение доступа к информации разной степени конфиденциальности в рамках защиты от несанкционированного доступа (НСД), которое реализуется без учета вероятных последствий в отношении угроз утечки информации по техническим каналам вследствие побочных электромагнитных излучений и наводок (ПЭМИН). В качестве оптимального решения задачи противодействия ПЭМИН на этапе проектирования системы защиты информации от НСД предлагается предварительное моделирование системы разграничения прав доступа, учитывающее угрозы, как несанкционированного доступа, так и угрозы утечки информации по техническим каналам. Таким образом, проектирование системы защиты информации на базе построенной модели разграничения прав доступа позволит исключить или значительно снизить вероятность угроз информационной безопасности.

1. Особенности информационных систем специального назначения

Основной особенностью информационных систем специального назначения является сложная структура, образованная взаимодействием функциональных подсистем обеспечения жизнедеятельности объекта размещения — являющихся отдельно поставляемыми изделиями (комплексами) или информационными системами в целом. Составные компоненты указанной информационной системы предназначены, как правило, для выполнения определённых функций, например, синхронизация в системе единого времени, мониторинг исправности технических средств, внутриобъектовая связь, автоматическая телефонная связь, передача информации и т. д. Взаимодействие функциональных подсистем строится по протоколам информационно-технического взаимодействия между ними,

разрабатываемым на этапе проектирования информационной системы. В качестве связующего звена в данном случае выступает объектовая информационная сеть, которая ограничена контролируемой зоной объекта. При этом при проектировании следует учитывать наличие каналов утечки информации за счет ПЭМИН, возникающих в процессе передачи информации между различными информационными системами, имеющими различный класс защиты по требованиям информационной безопасности [2].

Техническим каналом утечки информации (ТКУИ) называют электропроводную цепь или среду, по которой возможна утечка сведений, обрабатываемых техническими средствами передачи информации (ТСПИ) или обсуждаемых в акустической речевой форме. Невзирая на многообразие видов технических каналов утечки информации, для них характерно наличие ряда общих элементов. Это позволило сформировать, в интересах защиты информации, некоторую обобщенную модель ТКУИ и использовать ее для определения общих основ и принципов защиты. [3] Вариант такой модели показан на рис. 1.

Как видно, ключевыми элементами ТКУИ являются:

- одиночное ТСПИ или их совокупность как источники опасного сигнала (ОС). Опасным принято называть сигнал любой физической природы, несущий информацию, подлежащую защите. Физически носителями опасного сигнала могут быть: акустические колебания; протекающие по любым проводящим коммуникациям токи; наводимая на посторонние цепи электродвижущая сила (ЭДС);
- распространяющиеся в окружающем пространстве электромагнитные поля различных диапазонов. Этим определяется и многообразие вариантов, с физической точки зрения, среды распространения ОС. [4]

Среда распространения ОС — это некоторая материальная субстанция между ТСПИ как источником опасного сигнала и местом возможной установки аппаратуры перехвата информации. В качестве среды распространения ОС могут выступать: кабели связи, сигнализации и электропитания; шины и провода системы заземления; трубы систем вентиляции, тепло- и водоснабжения; окружающее пространство.



Рис. 1. Модель технического канала утечки информации за счет ПЭМИН

Аппаратура перехвата информации (АПИ) представлена одиночными или комплексированными средствами разведки ПЭМИН, обеспечивающими прием и регистрацию звуковых сигналов, электромагнитных излучений и наводок ТСПИ. Конструктивно АПИ является портативной, исполняемой в возимом, носимом и автоматическом автономном вариантах, аппаратурой. Во всех случаях основным принципом применения АПИ является ее максимально достижимое приближение к объекту разведки.

Помехи различной физической природы и различного происхождения объективно имеют место в любых условиях функционирования и размещения АПИ и защищаемых ТСПИ. Они воздействуют непосредственно на вход аппаратуры перехвата и существенно влияют на качество приема опасных сигналов. Реально на входе приемника АПИ существует не чистый ОС, а некоторое отношение сигнал/помеха.

Его текущее значение ведет к возникновению любой ситуации в пределах от гарантированной возможности до полной невозможности перехвата информации. Естественно, что наилучшим условиям перехвата соответствует взаимное положение ТСПИ и АПИ, как говорят, «вплотную», при котором отношение сигнал/помеха максимально. Наихудшим условием — такое пространственное разнесение ТСПИ и АПИ, при котором чувствительность и избирательность аппаратуры перехвата не обеспечивают выделения опасного сигнала на фоне помех. Отсюда вытекают и две взаимопротивоположные задачи. С позиций ведения разведки — максимально приблизить АПИ к объекту. С позиций защиты — создать условия, когда АПИ можно было бы установить только на таком удалении от объекта, на котором исключается возможность приема и регистрации опасных сигналов. Последнее, обеспечивается организационно за счет введения контролируемой зоны объекта защиты.

Контролируемой зоной (КЗ) называют территорию, на которой исключено несанкционированное и неконтролируемое пребывание лиц и транспортных средств — потенциальных носителей АПИ. С изложенных выше позиций, контролируемая зона должна иметь определенные размеры, а положение ее границы на местности должно соответствовать условиям, исключающим возможность приема и регистрации опасных сигналов средствами АПИ.

С учетом сказанного выше, наиболее эффективным решением проблемы утечки за счет ПЭМИН является применение гальванической развязки на стыке интерфейсов различных подсистем изделия и последующей передачи информации между ними по оптическим линиям связи. Условия размещения информационной системы на объекте как правило позволяют применять многомодовое оптическое волокно для обеспечения максимальной степени интеграции в счет снижения временных потерь при пере-

даче информации между удаленными друг от друга компонентами информационной сети. В данном случае, для разграничения передаваемой информации целесообразно использование технологии WDM.

2 Применение технологии WDM для меток безопасности BSO

Оптическое мультиплексирование с разделением по длине волны (Wavelength Division Multiplexing, WDM) — это технология передачи нескольких длин волн по одному волокну [5–6], что позволяет многократно увеличить пропускную способность волокна и исключить взаимодействие излучений различных длин волн между собой (рис. 2).

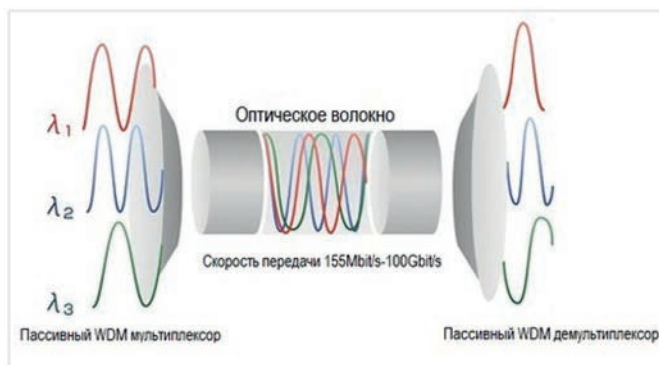


Рис. 2. Основной принцип технологии WDM

Department of Defense Basic Security option (DoD BSO, метка безопасности BSO) [7–8] является опцией безопасности, предназначенной для маркировки IP-пакетов в соответствии с классификациями безопасности.

Внедрение в IP-пакеты меток безопасности используется для контроля информации в распределённых многоуровневых информационных системах. Использование меток безопасности позволяет проверять легитимность передачи информации через сетевые соединения и подтверждать, что маршрут передачи дейтаграммы защищён в соответствии со степенью конфиденциальности (секретности) передаваемых данных.

Поле опций пакета IPv4 при передаче меток безопасности представлено в табл. 1.

Таблица 1

Поле опций IPv4 при передаче меток безопасности

Тип опции	Размер опции	Аргументы опции
130	8 бит	Метка безопасности

Формат опции DoD Basic Security представлен в таблице 2.

Таблица 2
 Формат метки безопасности BSO

TYPE = 130	LENGTH	CLASSIFICATION LEVEL	PROTECTION AUTHORITY FLAGS
10000010	xxxxxxxx	ssssssss	AAAAAAAA [10] AAAAAAAA0

В табл. 2 в поле «CLASSIFICATION LEVEL» указывает степень конфиденциальности (секретности), в соответствии с которой должен быть защищён IP-пакет и содержащаяся в нём информация.

Таким образом, интерфейсная плата оконечного устройства должна проводить анализ значения поля «CLASSIFICATION LEVEL» из табл. 2 для определения длины волны формируемого оптического сигнала.

3. Модель разграничения прав доступа

На основании предложенного способа применения меток безопасности BSO для технологии WDM рассмотрим модель разграничения прав доступа типовой информационной системы специального назначения (рис. 3).

Модель разграничения прав доступа для типовой информационной системы специального назначения заключается в применении мандатного управления доступом на каждом уровне обработки информации (см. рис. 3), при этом разделение информации разной степени конфиденциальности, передаваемой по оптическим линиям связи достигается за счет разной длины волны информационного сигнала.

В качестве примера реализации предлагаемой модели разграничения прав доступа рассмотрим передачу файла по информационной объектовой сети типовой информационной системы специального назначения (рис. 4).

Перед началом работы оператор оконечного устройства (ОУ) проходит процедуру идентификации с помощью персонального устройства контактной памяти. Считанные идентификационные данные (ИД) по протоколу Kerberos [9] передаются на сервер безопасности и авторизации (СБ), предоставляющий возможности аутентификации, авторизации и учета. Сервер безопасности и авторизации проводит проверку идентификационных данных оператора на их наличие в собственной базе данных (БД), производит аутентификацию оператора в системе и авторизацию, наделяя оконечное устройство возможностями доступа к тем услугам и сервисам (режимами работы), которые соответствуют уровню допуска оператора. В противном случае — при несоответствии переданных идентификационных данных

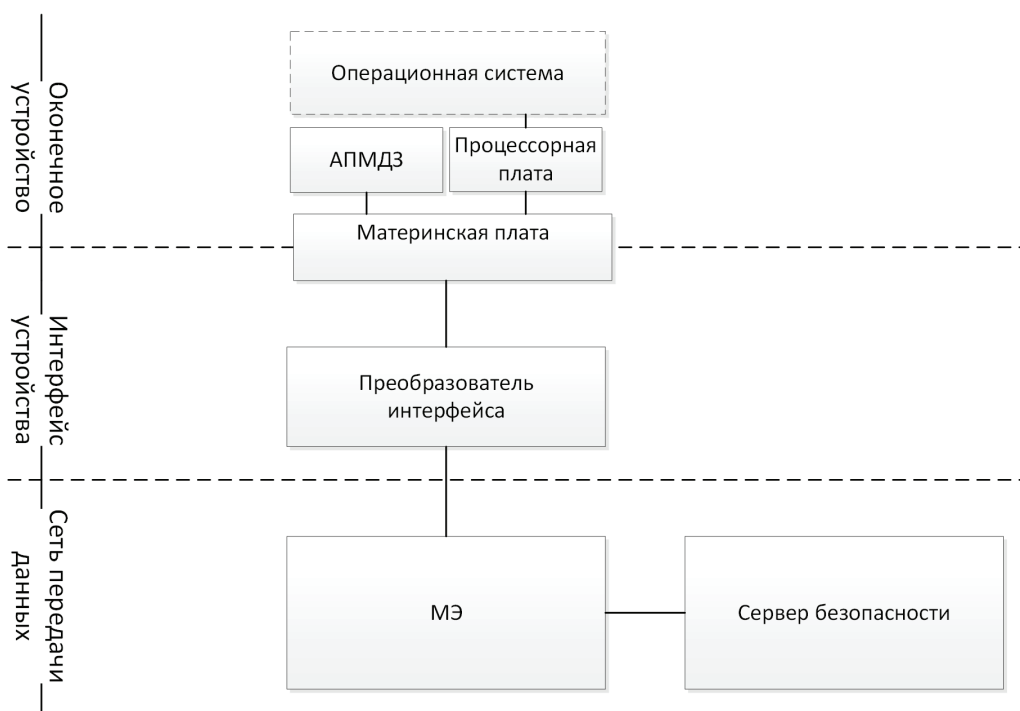


Рис. 3. Графическая интерпретация модели разграничения прав доступа для типовой информационной системы специального назначения

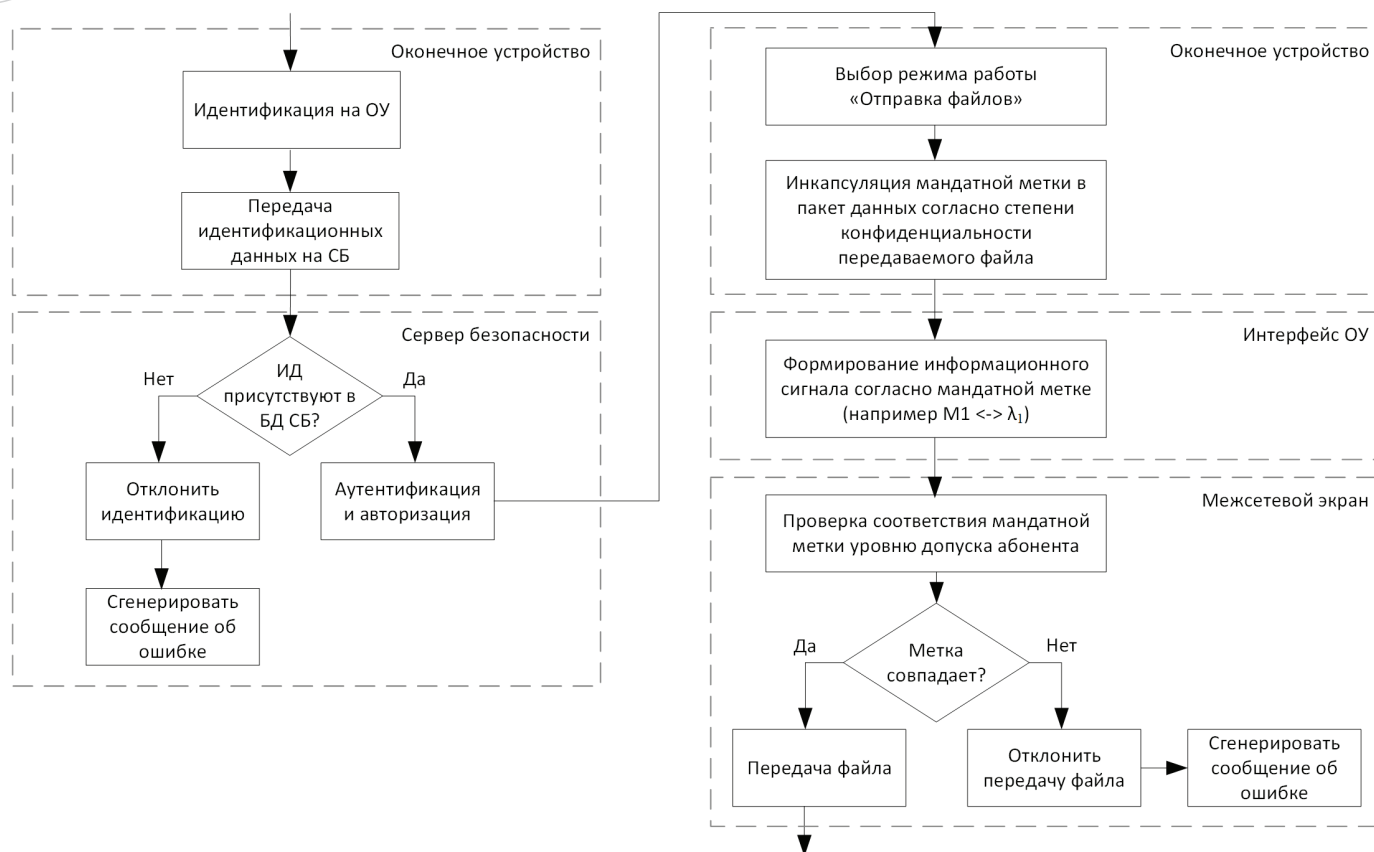


Рис. 4. Алгоритм передачи файла в типовой информационной сети

и данных в БД, сервер безопасности отказывает в аутентификации и возвращает на ОУ сообщение об ошибке. Все передаваемые оконечным устройством данные будут упакованы в IP-пакеты, поле опций которых будет содержать мандатную метку. Уровень секретности меток передаваемых пакетов должен быть не выше уровня секретности меток, допустимых для отправителя и получателя. Интерфейсная плата ОУ проводит анализ поля IP-пакета, содержащего мандатную метку, и по его результату формирует информационный оптический сигнал соответствующей длины волны λ_i . Сигнал посредством кабельной сети поступает на узел сети — межсетевой экран. Межсетевой экран (МЭ) — это комплекс аппаратных и программных средств, осуществляющий контроль и фильтрацию проходящих через него пакетов данных. Основной задачей МЭ является защита сети и отдельных её сегментов от несанкционированного доступа и утечки информации. Для анализа пакетов интерфейс МЭ преобразует оптический сигнал, передаваемый по линиям связи, обратно в электрический сигнал. Далее процессорная плата МЭ согласно установленным правилам фильтрации обрабатывает полученные пакеты данных — анализирует поля заголовка IP-пакета. В части проводимого процессорной платой анализа выполняется проверка соответствия степени конфиденциальности информации

уровню доступа адресата, в том числе режиму работы оконечного устройства адресата, на основании указанных в заголовке IP-пакета адреса получателя, адреса отправителя и мандатной метки. Исходя из полученного результата выполненного анализа, межсетевой экран пропускает информационный пакет или отклоняет его, генерируя сообщение об ошибке. [10–11]

В качестве другого примера рассмотрим сценарий голосового вызова между ОУ, находящихся в разных сетевых сегментах информационной системы (рис. 5).

Для установления соединения ОУ формирует запрос в IP-АТС [12–13] по стандартам протокола SIP с заданной мандатной меткой. Запрос проходит через МЭ, который проверяет мандатную метку пакета аналогично процедуре, описанной выше. Уровень секретности метки безопасности передаваемого пакета должен быть не выше уровня секретности меток безопасности допустимых для вызывающего и вызываемого абонентов. Анализируя метку безопасности, МЭ передает запрос в сеть, в которой зарегистрирован вызываемый абонент, или отклоняет его и генерирует сообщение об ошибке. При получении запроса IP-АТС определяет местоположение вызываемого абонента и определяет возможность соединения с заданным уровнем секретности. Если соединение может быть установлено, IP-АТС

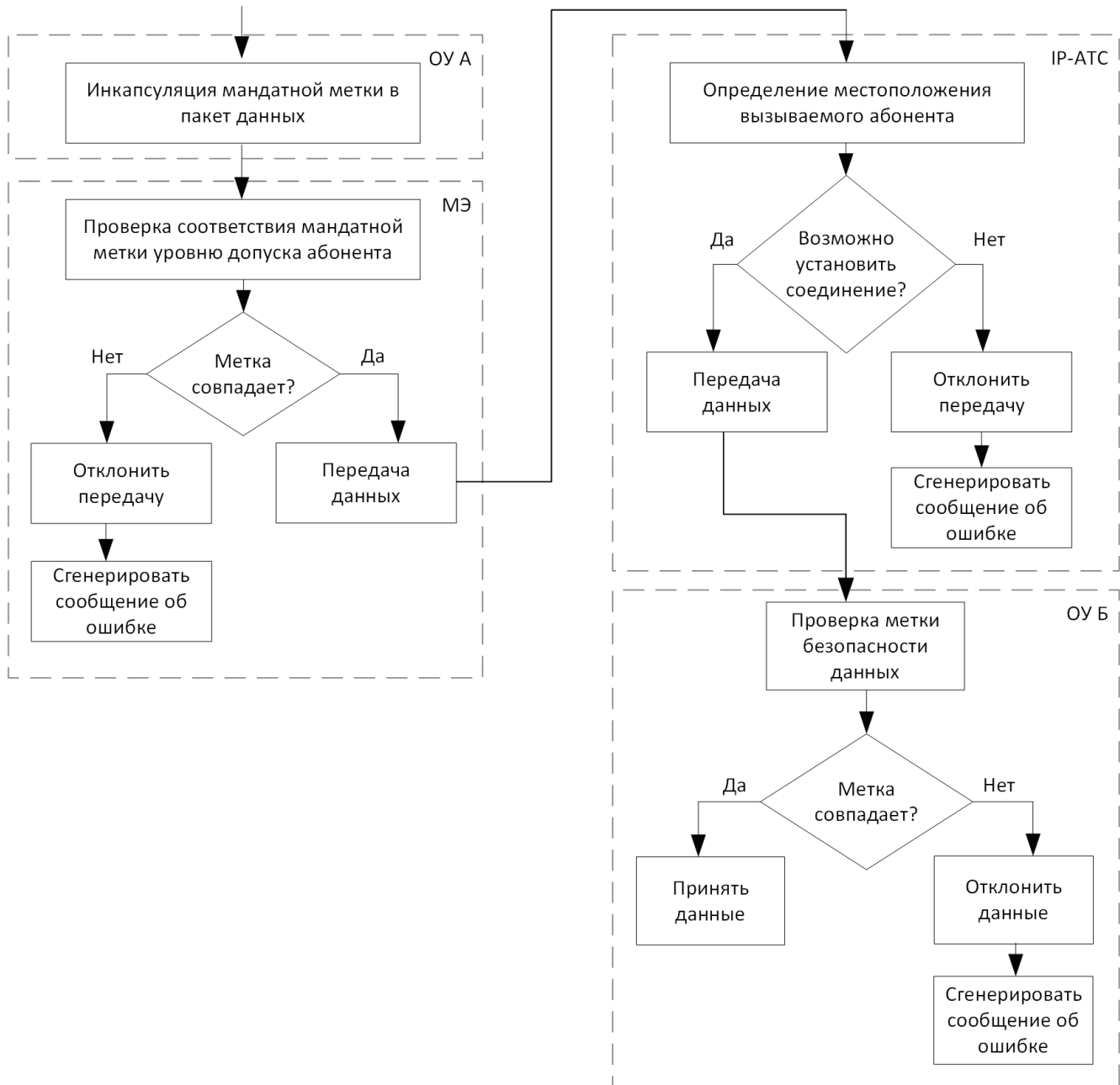


Рис. 5. Сценарий голосового вызова

формирует запрос по стандартам протокола SIP с мандатной меткой вызывающего абонента, в противном случае — с кодом отказа. ОУ вызываемого абонента при получении запроса проверяет метку безопасности. Если ОУ разрешен обмен информацией с данной меткой безопасности, то на входящий запрос ОУ возвращает подтверждение начала передачи данных, в противном случае запрос отклоняется. В процессе передачи данных каждое ОУ проверяет, что входящие сообщения имеют ту же метку безопасности, что и исходящие. При несовпадении меток ОУ, которое обнаружило несоответствие, прекращает прием и передачу дан-

ных, разрывает соединение по стандартам протокола SIP [14–15] с кодом отказа и генерирует соответствующее сообщение об ошибке.

Заключение

Предложенная модель разграничения прав доступа на основе технологии WDM и меток безопасности BSO для типовой информационной системы специального назначения обеспечивает разграничение доступа к информации разной степени конфиденциальности в части решения задачи защиты информации от несанкционированного до-



ступа с учетом исключения ПЭМИН при ее передаче по оптическим каналам связи.

Практическое применение представленной в статье модели должно учитывать такие ограничения как:

- наличие и особенности реализации меток безопасности BSO в применяемой операционной системе на оконечном устройстве;
- территориальную удаленность узлов информационной системы, так как технология WDM применима только для многомодовой оптики, не применяемой для удаленных на более 200 метров друг от друга узлов связи в силу затухания информационного сигнала.

Литература:

1. *Холопов А. А.* Информационные системы управления специального назначения // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические науки. 2017. № 2. С. 51–54.
2. *Носов Л. С.* Оценка защищенности СВТ путем моделирования канала ПЭМИН // Математические структуры и моделирование. 2014. № 4 (32). С. 254–257.
3. *Бузов Г. А.* Защита информации ограниченного доступа от утечки по техническим каналам. М.: Горячая линия — Телеком, 2017. 586 с.
4. *Артамошин С. А.* Защита информации от утечки по каналу побочных электромагнитных излучений // Правовая информатика. 2016. № 3. С. 4–12.
5. *Antwiwaa A., Kumar A., Jaiswal A. K.* Source based Security Issues in WDM Systems // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). 2017. Vol. 7. No. 4. Pp. 2101–2108.
6. *Сленов Н. Н.* Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи. 2-е изд. М.: Радио и связь, 2003. 468 с.
7. *Kent S.* U. S. Department of Defense: Security Options for the Internet Protocol. RFC1038. 1991. 16 p.
8. *Gont F.* Recommendations on Filtering of IPv4 Packets Containing IPv4 Options. BCP 186 / RFC7126. 2014. 17 p.
9. *Narwal A., Tomar S.* Kerberos Protocol: A Review // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). 2015. Vol. 4. No. 4. Pp. 750–752.
10. *Imran M. M., Ahmad B.* Role of firewall Technology in Network Security // International Journal of Innovations & Advancement in Computer Science. 2015. Vol. 4. No. 12. Pp. 3–6.
11. *Лапонина О. П.* Основы сетевой безопасности. Ч. 1: Межсетевые экраны. М.: НОУ «ИНТУИТ», 2014. 378 с.
12. *Mr. Sonaskar S. R., Dr. Khanapurkar M. M.* Design & Implementation of IP-PBX for Small Business Organization // International Journal of Engineering Innovation & Research. 2012. Vol. 1. No. 4. P. 288.
13. *Shirasawa S., Kurahashi M., Noda O., Ogami K.* IP-Telephony Technology and Solution Families Covering One Box Startup to Carrier Grade Services // NEC Journal of Advanced Technology. 2004. Pp. 133–142.
14. *Jaber A. N., Tan Chen-Wei.* Session Initiation Protocol Security: A Brief Review // Journal of Computer Science. 2012. Pp. 348–357.
15. *Sawda S.E., Urien P., Sawda R.E.* A trust communication with SIP protocol // Proceedings of the International Conference on Computer Systems and Applications (Hammamet, Tunisia, 16–19 May 2010). IEEE Xplore Press, 2010. Pp. 1–6 A.

MODEL OF LIMITATION OF RIGHTS OF ACCESS FOR SPECIAL PURPOSE INFORMATION SYSTEM

ALEKSANDER S. KURAKIN

St. Petersburg, Russia, nirtit@gmail.com

ALEKSANDRA A. KOSTYREVA

St. Petersburg, Russia, sandra-1995@yandex.ru

KEYWORDS: wavelength division multiplexing; basic security option; differentiation of access rights; protection against unauthorized access; special purpose information system.

ABSTRACT

The current stage in the development of society is characterized by the extensive use of special-purpose information systems designed for solving various tasks, for example, the tasks of state administration, command and control of troops and weapons, and ecologically

dangerous and economically important industries. Due to the importance of these systems, there is an urgent need to ensure their information security, one of the main aspects of which is protection against unauthorized access. As a protection measure against un-



authorized access, access to information of different confidentiality is differentiated, the implementation of which does not take into account the consequences of the threat of information leakage through technical channels due to spurious electromagnetic emissions and interference. In order to neutralize the mentioned security threats, a model of access rights distinction based on the technology "Wavelength Division Multiplexing" and security labels "Basic Security option" has been proposed. It is shown that the use of security labels allows you to verify the legitimacy of information transmission over network connections, and also allows you to confirm that the route of the datagram is protected in accordance with the degree of secrecy of the transmitted data. An algorithm for secure file transfer using a special-purpose information system is described. The scenario of a secure voice call between end devices located in different network segments of a special-purpose information system is given. The proposed model of access rights delineation provides for delineating access to information of varying degrees of confidentiality in terms of solving the problem of protecting information from unauthorized access, taking into account the exclusion of spurious electromagnetic radiation and interference during its transmission via optical communication channels.

REFERENCES

- Holopov A.A. Information management system of special purpose. *Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice. Series Natural and technical sciences*. 2017. No. 2. Pp. 51-54. (In Russian)
- Nosov L.S. Estimation of security by modeling the TEMPEST channel of computer. *Mathematical structures and modeling*. 2014. No. 4(32). Pp. 254-257. (In Russian)
- Buzov G.A. *Zashchita informacii ogranichennogo dostupa ot utechki po tehničeskim kanalām* [Protection of restricted access information from leaks through technical channels]. Moscow: Goryachaya liniya – Telecom, 2017. 586 p. (In Russian)
- Artamoshin S.A. *Zashchita informatsii ot utechki po kanalu pobochnykh jelektromagnitnykh izluchenij* [Protection of information against leakage through the side electromagnetic radiation channel]. *Pravovaya informatika* [Legal informatics]. 2016. No. 3. Pp. 4-12. (In Russian)
- Antwiwaa A., Kumar A., Jaiswal A.K. Source based Security Issues in WDM Systems. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2017. Vol. 7. No. 4. Pp. 2101-2108.
- Slepov N.N. *Sovremennye tehnologii cifrovyyh optovolokonnykh setey svyazi* [Modern technologies of digital fiber-optic communication networks]. Moscow: Radio i svyaz, 2003. 468 p. (In Russian)
- Kent S. U.S. Department of Defense: Security Options for the Internet Protocol. RFC1038. 1991. 16 p.
- Gont F. Recommendations on Filtering of IPv4 Packets Containing IPv4 Options. BCP 186 / RFC7126. 2014. 17 p.
- Narwal A., Tomar S. Kerberos Protocol: A Review. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2015. Vol. 4. No. 4. Pp. 750-752.
- Imran M.M., Ahmad B. Role of firewall Technology in Network Security. *International Journal of Innovations & Advancement in Computer Science*. 2015. Vol. 4. No. 12. Pp. 3-6.
- Laponina O.R. *Osnovy setevoy bezopasnosti. Chast 1. Mezhsetevye ekrany* [Basic of network security. Part 1. Firewalls]. Moscow: NOU «INTUIT» Publ., 2014. 378 p. (In Russian)
- Mr. Sonaskar S.R., Dr. Khanapurkar M.M. Design & Implementation of IP-PBX for Small Business Organization. *International Journal of Engineering Innovation & Research*. 2012. Vol. 1. No. 4. P. 288.
- Shirasawa S., Kurahashi M., Noda O., Ogami K. IP-Telephony Technology and Solution Families Covering One Box Startup to Carrier Grade Services. *NEC Journal of Advanced Technology*. 2004. Pp. 133-142.
- Jaber A.N., Tan Chen-Wei. Session Initiation Protocol Security: A Brief Review. *Journal of Computer Science*. 2012. Pp. 348-357.
- Sawda, S.E., Urien P., Sawda R.E. A trust communication with SIP protocol. *Proceedings of the International Conference on Computer Systems and Applications – AICCSA 2010 (Hammamet, Tunisia, 16-19 May 2010)*. IEEE Xplore Press, 2010. Pp. 1-6 A.

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Kurakin A.S., PhD, Deputy Director for Technical Protection of Information of the OOO "Special Technology Center"; Kostyreva A.A., research engineer second category of the AO "Tehnologii Radiokontrolya".



doi: 10.24411/2409-5419-2018-10263

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ОЦЕНКИ КОЛИЧЕСТВА И СТРУКТУРЫ АТТРИБУТОВ В ЗАДАЧАХ КЛАССИФИКАЦИИ МОБИЛЬНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

ШЕЛУХИН

Олег Иванович¹

БАРКОВ

Вячеслав Валерьевич²

ПОЛКОВНИКОВ

Михаил Вадимович³

АННОТАЦИЯ

Для оценки эффективности алгоритмов классификации в режимах обучения и тестирования с помощью разработанного программно-аппаратного комплекса была сформирована база данных мобильных приложений трафика, WEB (http, https), mail (SMTP, IMAP), Skype (TCP, UDP) и др. Из полученных потоков трафика 66% исходных данных использовались для обучения, остальные для тестирования алгоритмов классификации выбранных приложений методами машинного обучения. В качестве алгоритмов классификации методами машинного обучения рассматривались: Random Forest, C4.5, SVM, Adaboost, Naive Bayes. Для обоснования выбора количества атрибутов классификации использовались оберточный и фильтрующий методы. Показано, что некоторые атрибуты, используемые для классификации трафика, не несут значимой информации, и их использование незначительно влияет на эффективность классификации. Рассмотрены алгоритмы выбора атрибутов классификации: PCA, InfoGain, CFS, Wrapper. Показано, что использование оберточного алгоритма выбора атрибутов является ресурсоемкой вычислительной операцией, которая при большом количестве атрибутов требует длительного времени. Показано, что среди рассмотренных алгоритмов классификации предпочтение следует отдать алгоритму C4.5. Сравнительный анализ алгоритмов отбора информативных атрибутов мобильных приложений показал, что наиболее эффективным и легко реализуемым является алгоритм InfoGain. Специфической особенностью классификации мобильных приложений является высокая информативность всего нескольких атрибутов. При выборе способа отбора атрибутов наиболее предпочтителен алгоритм, при котором сначала отбирается наиболее информативный атрибут, а к нему добавляются следующие менее информативные. Для количественной оценки отбора количества атрибутов предложен алгоритм отбора на основе их информативности.

Сведения об авторах:

¹д.т.н., профессор, заведующий кафедрой информационной безопасности Московского технического университета связи и информатики, г. Москва, Россия, sheluhin@mail.ru

²старший преподаватель кафедры информационной безопасности Московского технического университета связи и информатики, г. Москва, Россия, viacheslav.barkov@gmail.com

³магистрант кафедры информационной безопасности Московского технического университета связи и информатики, г. Москва, Россия, mnxamoto@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: классификация; достоверность; DataMining; атрибуты; Random Forest; метрики; протокол.

Для цитирования: Шелухин О.И., Барков В.В., Полковников М.В. Сравнительный анализ алгоритмов оценки количества и структуры атрибутов в задачах классификации мобильных приложений // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 2. С. 90-100. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10263

Постановка задачи

При классификации мобильных приложений сетевого трафика [1], важное значение имеют данные, используемые для обучения классификатора (например, экспериментально полученный набор потока сетевых данных), и корректный выбор атрибутов. Процесс отбора атрибутов [2] является важным подготовительным этапом разработки классификатора, позволяющий оптимизировать процесс его обучения на предоставляемом наборе данных. Результат этого этапа может положительно сказаться на вычислительной сложности классификации.

В тех случаях, когда набор данных содержит большое количество прецедентов, отбор атрибутов является необходимым этапом машинного обучения (МО), позволяющим сократить количество вычислительных операций. В результате будет получен набор данных, признаки которого будут отражать необходимую и достаточную информацию об интересующем классе, что в свою очередь ускорит процесс обучения классификатора. Методы отбора атрибутов можно разделить на фильтрующие и оберточные. *Фильтрующие* методы осуществляют выбор атрибутов, опираясь только на исходные данные, представленные в обучающем наборе. В результате формируется независимая оценка и осуществляется отбор наилучшего описания атрибутов до начала обучения, полагаясь на определенные метрики. *Оберточные* методы оценивают выбранное подмножество, полагаясь как на обучающий алгоритм, так и на его характеристики. В отличие от фильтрующих методов, они позволяют получить более точную оценку прогнозирования, поскольку подстраиваются под особенности алгоритма обучения. Однако подобные алгоритмы являются достаточно трудоемкими в вычислительном отношении.

Цель статьи: Сравнительный анализ алгоритмов выделения наиболее информативных атрибутов мобиль-

ных приложений, как на этапе обучения, так и на этапе тестирования, а также оценка влияния ограничения количества атрибутов на эффективность и быстродействие алгоритмов классификации.

Захват и анализ сетевого трафика мобильных приложений

Для формирования базы данных трафика мобильных приложений был разработан программный комплекс (ПК) «Система анализа трафика» (САТ), включающий в себя сервер баз данных, сервер приложений, Web-приложение и клиентское программное обеспечение (ПО) для мобильных устройств под управлением операционной системы (ОС) Android (мобильный клиент) [13].

Процесс сбора трафика осуществлялся с использованием разработанного ПО с учётом взаимодействия компонентов программного комплекса между собой и с внешними мобильными приложениями. Структура комплекса и сбора реального мобильного трафика представлены на рис. 1. На смартфон или планшет под управлением ОС Android установлен мобильный клиент ПК САТ. Клиент перехватывает пакеты сетевого трафика заданных приложений, которые также установлены на мобильном устройстве.

Перехваченные пакеты сетевого трафика отправляются на сервер приложений ПК САТ, установленной на серверной ЭВМ и управляемой ОС Windows Server 2016.

Сервер приложений ПК САТ группирует пакеты сетевого трафика в потоки и сохраняет данные в базу данных с помощью сервера.

Обмен данными между компонентами ПК САТ осуществляется через глобальную сеть Интернет с использованием протокола HTTP в формате JSON. Сервер приложения включает в себя Web-службу, предоставляющую клиентам REST API, с помощью которого можно получить доступ к функциям сбора пакетов сетевого трафика,



Рис. 1. Схема сбора мобильного трафика

управления наборами данных, создания и обучения классификаторов, классификации и другим функциям.

С использованием ПК CAT был собран трафик мобильных приложений трёх категорий: «С шифрованием трафика», «Без шифрования трафика», «С частичным шифрованием трафика» [14].

В ходе работы была спроектирована, реализована и наполнена база данных. В ходе инфологического и даталогического проектирования выделено 21 сущность, 6 из которых (apps, flows, flowsinset, flowsets, packets, backgroundflows) используются для непосредственного хранения данных трафика. В ходе физического проектирования был выбран сервер баз данных MySQL 5.7 и создана 21 таблица. Для доступа к базе данных с применением технологии Java Enterprise Edition было создано корпоративное приложение, предоставляющее доступ с помощью REST API. Для сбора трафика с мобильных устройств под управлением операционной системы Android было разработано приложение, которое с помощью прикладного программного интерфейса для создания виртуальных частных

сетей, собирает пакеты сетевого трафика, идентифицирует приложение-источник и отправляет их по протоколу HTTP серверному программному обеспечению. С использованием клиентского и серверного программного обеспечения созданная база данных была наполнена трафиком 18 основных мобильных приложений. В ходе сбора данных было получено 71 667 потоков и 6 989 991 пакетов. Характеристика созданной базы данных приведена в табл. 1.

Алгоритмы и метрики алгоритмов классификации

Для классификации приложений использовались алгоритмы машинного обучения: NaiveBayes, C4.5 [1,6], Random Forests [7], Support Vector Machine (SVM) [8], Adaptive Boost [10]. Для оценки эффективности алгоритмов классификации использовались следующие метрики информационного поиска [4–7]: Precision (Точность), Recall (Полнота), F-Measure (F-мера), ROC-кривые (Receiver Operating Characteristic Curve) и AUC (Area Under Curve) — площадь под ROC-кривой.

Таблица 1

Сводная таблица собранной базы данных трафика мобильных приложений

№	Название приложения	Тип трафика	Количество	
			Потоков	Пакетов
1	Почта Mail.ru	Шифрованный	5078	246184
2	Сбербанк онлайн	Шифрованный	5110	241235
3	Skype	Шифрованный	5244	232510
4	Пикабу	Шифрованный	5329	265071
5	Instagram	Шифрованный	4979	1916363
6	Hearthstone	Шифрованный	5028	227688
7	Wolfram	Без шифрования	5190	61140
8	Московский комсомолец	Без шифрования	5335	107202
9	Фишки.нет	Без шифрования	5422	576581
10	НТВ	Без шифрования	5908	233982
11	Пицца Суши Вок	Без шифрования	5097	64460
12	Годвилль	Без шифрования	5016	61343
13	Google Chrome	Частично шифрованный	3865	620277
14	Коммерсант	Частично шифрованный	5325	338327
15	Booking	Частично шифрованный	5326	552606
16	4PDA	Частично шифрованный	4974	524215
17	Яндекс браузер с Алисой	Частично шифрованный	5132	139595
18	Badoo	Частично шифрованный	4976	581212



Методы выбора атрибутов классификации

Широкое распространение получили следующие алгоритмы выбора атрибутов [1–3]:

- Алгоритм выбора главных компонент (Principal Components Analysis, PCA).
- Алгоритм ранжирования атрибутов на основе информационного усиления (Information Gain Attribute Ranking [10], InfoGain).
- Алгоритм, основанный на корреляции (A Correlation-based Feature Selector [12], CFS).
- Оберточный алгоритм выбора атрибутов (Wrapper [1, 9]).

Оптимальный состав и количество атрибутов алгоритмов классификации определяется выбором такого подмножества, на котором сосредоточена основная информация о анализируемом приложении. Алгоритм выбора атрибутов осуществляет поиск лучшего подмножества, используя для оценки алгоритм индукции. Эффективность перечисленных алгоритмов доказана также при классификации зашифрованных приложений [5].

Алгоритм ранжирования атрибутов на основе информационного усиления (InfoGain) представляет собой процесс сортировки атрибутов, базирующийся на информационном усилении между классом и признаком. Пусть F — множество атрибутов, а C — множество классов объекта набора данных. С учетом введенных обозначения уравнения оценки энтропии данного класса до и после наблюдения атрибута s , имеют следующий вид:

Информационная энтропия класса до наблюдения атрибута (1)

$$H(C) = -\sum_{c \in C} p(c) \cdot \log_2 p(c), \quad (1)$$

а информационная энтропия класса после наблюдения атрибута (2)

$$H(C|F) = -\sum_{f \in F} p(f) \cdot \sum_{c \in C} p(c|f) \cdot \log_2 p(c|f), \quad (2)$$

где $p(c)$ — априорная вероятность появления класса c ; $p(f)$ — априорная вероятность появления атрибута f ; $p(c|f)$ — условная вероятность появления класса c при наличии атрибута f .

Разность энтропий $H(C)$ и $H(C|F)$, характеризующая новые сведения об этом классе (информативность), называется информационным усилением. Оценка атрибутов F_i основывается на информационном усилении (3):

$$\begin{aligned} gain &= H(C) - H(C|F_i) = H(F_i) - H(F_i|C) = \\ &= H(F_i) + H(C) - H(F_i, C), \end{aligned} \quad (3)$$

Алгоритм ранжирования атрибутов на основе информационного усиления является одним из самых простых и быстрых, что является его главным достоинством.

Алгоритм выбора главных компонент (PCA) является фильтрующим. Задачей алгоритма является уменьшение пространства атрибутов с минимальной потерей полезной информации. Главные компоненты являются результатом вычисления собственных векторов и собственных значений ковариационной матрицы атрибутов, отображающих значения (важность) каждого элемента исходных данных. Построенные внутри пространства атрибутов главные компоненты формируют новое подпространство, исключаящее из своего множества некоторые второстепенные атрибуты. Подобный подход можно назвать проекционным, поскольку признаки набора данных проецируются на гиперплоскость, меньшей размерности по сравнению с изначальной моделью исходных данных. Отличительной чертой PCA является непараметрический анализ.

Алгоритм выбора атрибутов, основанный на корреляции (CFS) является фильтрующим, осуществляющим ранжирование описания атрибутов. Неприемлемые атрибуты, имеющие слабую корреляцию с классом — игнорируются. Резервные атрибуты экранируются, так как они сильно коррелированы с одним или несколькими оставшимися атрибутами. Выбор атрибута зависит от того, насколько он предсказывает классы в областях пространства объектов набора данных, которые еще не были предсказаны другими признаками. Функция оценки подмножества атрибутов — эвристическое «качество» описания атрибутов s , выглядит следующим образом (4):

$$M_s = \frac{k \cdot \bar{r}_{cf}}{\sqrt{k + k(k-1) \cdot r_{ff}}}, \quad (4)$$

где k — количество атрибутов; \bar{r}_{cf} — среднее значение корреляции «атрибут-класс»; r_{ff} — среднее значение корреляции атрибутов.

Числитель уравнения (4) показывает, на сколько прогнозируемым для класса является анализируемый набор атрибутов. Знаменатель характеризует избыточность атрибутов.

Оберточный алгоритм выбора атрибутов (Wrapper) [9] позволяет выделить атрибуты, под воздействием индукционного алгоритма. При контролируемом обучении, алгоритм индукции обычно представлен обучающим набором данных, в котором каждый объект описывается вектором значений атрибутов и класса. Задачей алгоритма индукции является формирование классификатора, который будет полезен в будущем. В результате, классификатор представляет собой отображение из пространства значений атрибутов в набор значений класса.



Подмножество атрибутов с наилучшей оценкой выбирается в качестве окончательного набора, на котором и выполняется алгоритм индукции. После завершения этапа выбора атрибутов и обучения, классификатор оценивается на независимом тестовом наборе, который не использовался на этапе обучения.

Общий принцип работы методов выбора атрибутов следующий. Алгоритмы фильтрующих методов строятся на корреляционных зависимостях между признаками и классами набора данных. Алгоритмы оберточных методов используют при выборе атрибутов индукционный ал-

горитм, позволяющий отобрать для классификатора лучшее подмножество.

Результаты отбора атрибутов

Во время исследований использовался полный список атрибутов, формируемый серверным ПО и состоящий из 23 позиций.

Алгоритм InfoGain. Результаты ранжирования атрибутов методом InfoGain представлены в табл. 2.

Гистограмма информативности атрибутов, построенная по результатам ранжирования с использованием

Таблица 2

Результаты ранжирования атрибутов

№	Атрибут
1	DestinationIPAddress - IP-адрес назначения
2	SourceIPAddress - IP-адрес источника
3	TransportLayerPayload SizeFromServer -Общий объем полезной нагрузки на транспортном уровне от сервера
4	TransportLayerPayload SizeFromClient - Общий объем полезной нагрузки на транспортном уровне от клиента
5	NetworkLayerPayload SizeFromServer - Общий объем полезной нагрузки на сетевом уровне от сервера
6	EfficiencyOfServer - КПД сервера
7	AverageSize OnTransportLayerFromServer - Средний размер пакета со стороны сервера
8	AverageSizeData OnTransportLayerFromServer - Средний размер порции данных со стороны сервера
9	RatioOfData - Соотношение полезной нагрузки
10	StandardDeviation OfPacketSizeFromServer - Стандартное отклонение размера пакета со стороны сервера
11	StandardDeviationOfData OnTransportLayerFromServer - Стандартное отклонение размера данных со стороны сервера
12	StandardDeviationOfData OnTransportLayerFromClient - Стандартное отклонение размера порции данных со стороны клиента
13	StandardDeviation OfPacketSizeFromClient - Стандартное отклонение размера пакета со стороны клиента
14	RatioByte - Соотношение байт
15	NetworkLayerPayload SizeFromClient - Общий объем полезной нагрузки на сетевом уровне от клиента
16	AverageSize OnTransportLayerFromClient- Средний размер пакета со стороны клиента
17	EfficiencyOfClient - КПД клиента
18	AverageSizeData OnTransportLayerFromClient - Средний размер порции данных со стороны клиента
19	RatioOfNumberOfPackets - Соотношение пакетов
20	NumberOfServingsFromServer - Общее количество переданных сегментов транспортного уровня со стороны сервера
21	NumberOfServingsFromClient - Общее количество переданных сегментов транспортного уровня со стороны клиента
22	AverageNumberOfDataPacketsFromClient - Среднее число пакетов на порцию данных со стороны клиента
23	AverageNumberOfDataPacketsFromServer - Среднее число пакетов на порцию данных со стороны сервера

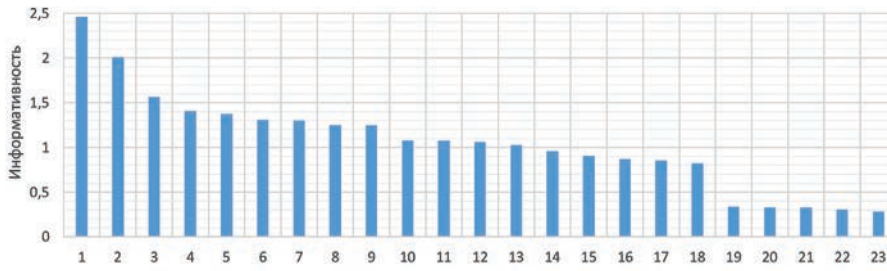


Рис. 2. Гистограмма информативности атрибутов

InfoGain, соответствующих нумерации атрибутов в табл. 2, представлена на рисунке 2.

Можно видеть, что изменение информативности атрибутов лежит в диапазоне 0,281 до 2,463.

Алгоритм PCA. Эксперименты проводились с двумя наборами данных с помощью алгоритма поиска Ranker. В результате эксперимента были отобраны 12 атрибутов, с номерами 3, 4, 5, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 16, 18, 21 в табл. 2.

Алгоритм CFS. В результате отбора атрибутов с помощью алгоритма CFS было выбрано всего два атрибута № 1 и 2 в табл. 2.

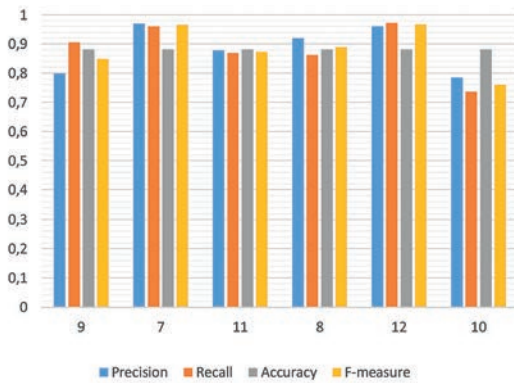
Алгоритм Wrapper. Эксперименты по отбору атрибутов проводились с двумя наборами данных с помощью

алгоритмов поиска Best First и Greedy Stepwise, реализующими оберточный метод. Были выбраны следующие атрибуты №№ 1, 2, 10, 17, 19, 23 в табл. 2.

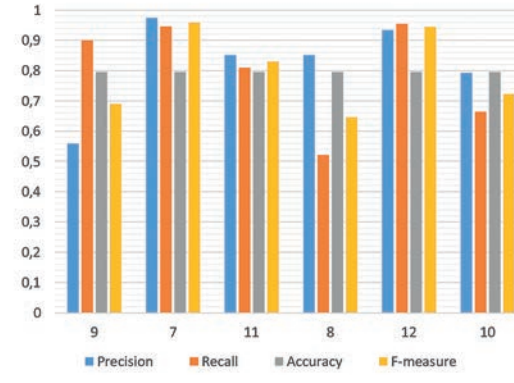
Сравнительные оценки алгоритмов выделения информативных атрибутов

В качестве примера на рис. 3а-3г представлены результаты классификации нешифрованного набора приложений, соответствующих нумерации приложений в табл. 1, алгоритмом SVM.

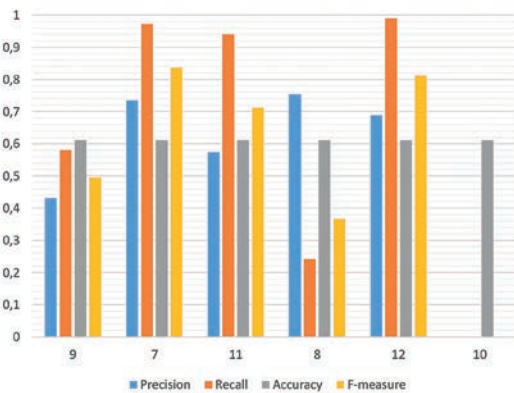
Из представленных зависимостей видно, что наилучшие результаты показывает алгоритм InfoGain при полном наборе атрибутов. Вместе с тем, как видно из рис. 2 ряд



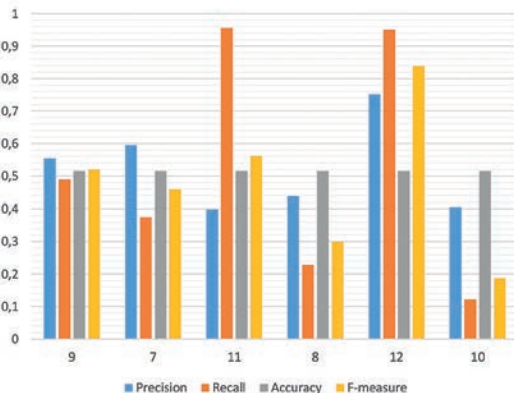
а)



б)



в)



д)

Рис. 3. Результаты классификации мобильных приложений при использовании различных алгоритмов отбора информативных атрибутов: а) Полный набор атрибутов InfoGain; б) Wrapper в) CFS д) PCA



Таблица 3

Характеристики используемого набора данных по типу приложений при анализе сетевых потоков

Название приложения	Количество потоков в обучающей выборке	Количество потоков в тестовой выборке
Почта Mail.ru	3356	1644
Сбербанк	3303	1697
Скуре	3329	1671
Пикабу	3325	1675
Инстаграмм	3357	1643
Hearthstone	3330	1670
Всего	20000	10000

атрибутов мало информативны и не существенно влияют на эффективность классификации, однако увеличивают вычислительную сложность. В этой связи были проведены исследования по способу отбора и количеству информативных атрибутов алгоритма InfoGain.

Оценка эффективности способов отбора атрибутов алгоритма InfoGain

В качестве исследуемого алгоритма машинного обучения был выбран Random Forest. В табл. 3 приведены числовые характеристики сетевых потоков по приложениям используемых для обучающей и тестовой выборок.

Для оценки качества классификации были вычислены метрики качества и временные метрики: Precision; Recall; Accuracy; F-measure; TPR; FPR, а также $T_{об}$ — время обучения и $T_{тест}$ — время тестирования.

На основе ранжирования, представленного на рис. 2 было рассмотрен следующий способ отбора атрибутов. Увеличение количества атрибутов осуществлялось путем

добавления наиболее информативных атрибутов («Сверху-вниз») в порядке, указанном в табл. 2.

На рис. 4 и рис. 5 представлены результаты эксперимента по увеличению количества атрибутов, путем добавления наиболее информативных по алгоритму «Сверху-вниз».

Из представленных зависимостей видно, что наиболее информативные атрибуты № 1, 2 и 3 в табл. 2 в основном и определяют качество классификации мобильных приложений. По мере увеличения количества атрибутов качество классификации незначительно снижается,

в то время как время обучения и тестирования наоборот возрастают (рис. 5).

Как видно из представленных зависимостей использование нескольких наиболее информативных атрибутов указанных в табл. 2 обеспечивает высокую достоверность правильной классификации TPR (рис. 6), что достигается, однако за счет высокой вероятности ложной классификации приложений FPR (рис. 7).

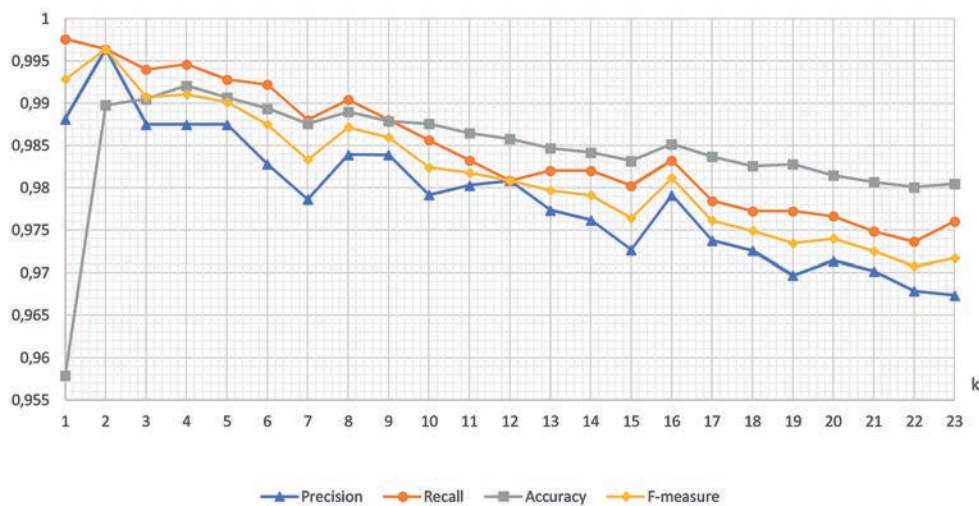


Рис. 4. Изменение качества классификации, при увеличении количества атрибутов, путем добавления наиболее информативных («Сверху-вниз»)

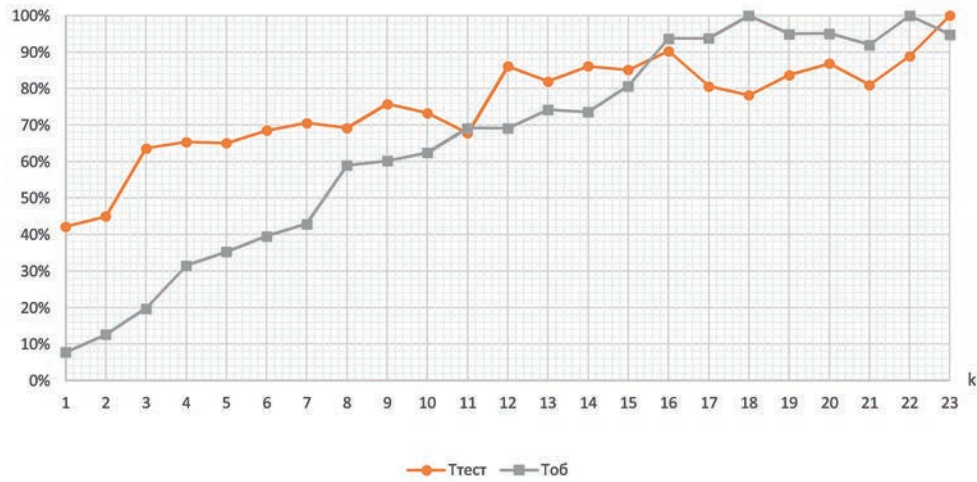
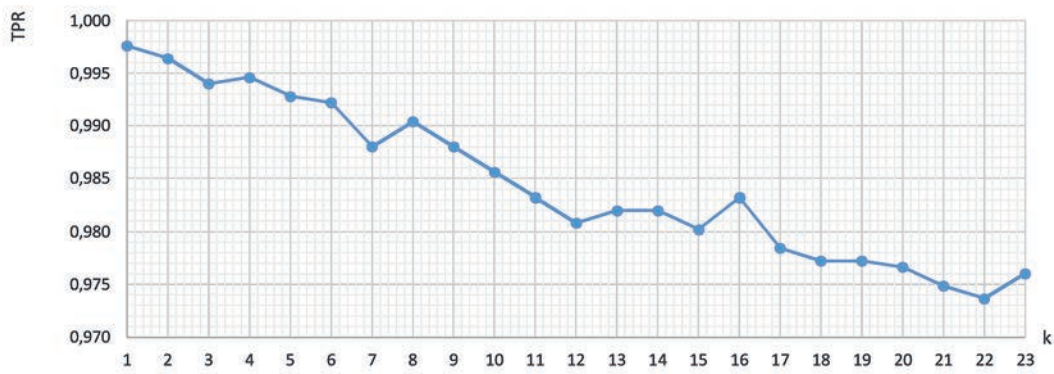
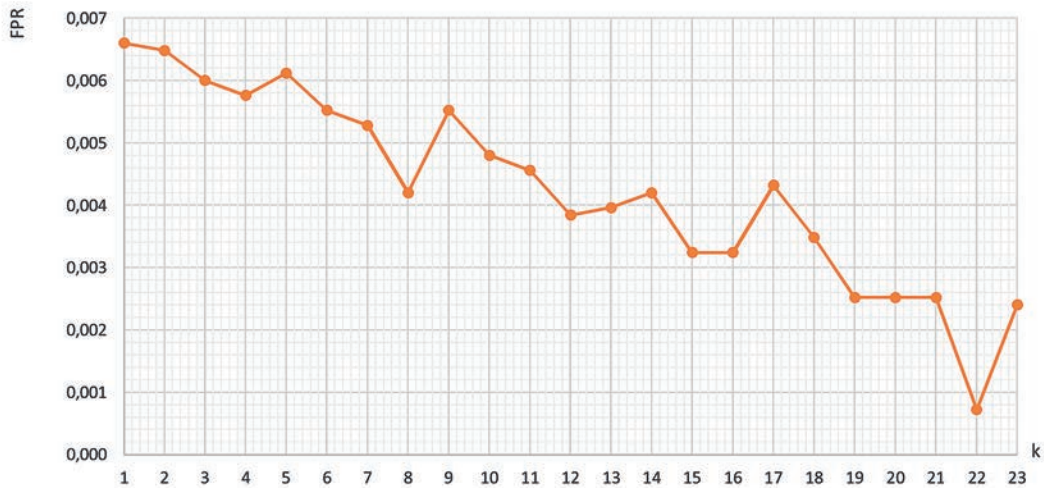


Рис. 5. Изменение $T_{об}$; $T_{тест}$ классификатора (в процентах по сравнению со случаем использования всех атрибутов), при увеличении количества атрибутов, добавляя наиболее информативные («Сверху-вниз»)



а)



б)

Рис. 6. Изменение характеристик достоверности классификации при добавлении наиболее информативных (Сверху-вниз): а) TPR; б) FPR

Как видно при использовании первых 20 атрибутов достоверность правильной классификации снижается с 0,998 до 0,995 в то время как вероятность ложной классификации снижается более чем в 2 раза с 0,007 до 0,0028.

Представленные зависимости позволяют предложить следующий алгоритм отбора количества атрибутов на основе их информативности:

Шаг 1. Задавшись вероятностью $FPR = \text{const}$ по рис. 6б оценить количество требуемых атрибутов ka ;

Шаг 2. По найденному значению ka по рис. 6а оценить вероятность правильной классификации TPR;

Шаг 3. По найденному значению ka по рис. 5 оценить требуемое время обучения $T_{об}$ и время тестирования $T_{тест}$;

Шаг 4. По найденному значению ka по рис. 4 оценить достижимые метрики качества: Precision; Recall; Accuracy; F-measure.

В качестве примера на рисунках 4...6 показано выполнение алгоритма для случая, когда $FPR = \text{const} = 0,04$. Как видно в этом случае $ka = 12$, а $TPR = 0,98$ (рис. 6а).

Выводы

Сравнительный анализ алгоритмов отбора информативных атрибутов мобильных приложений показал, что наиболее эффективным и легко реализуемым является алгоритм InfoGain.

Специфической особенностью классификации мобильных приложений является высокая информативность всего нескольких наиболее информативных атрибутов, представленных в табл. 2. Наиболее предпочтителен способ отбора атрибутов «Сверху-вниз», при котором сначала отбирается наиболее информативный атрибут, а затем к нему добавляются следующие менее информативные. Для оценки количества атрибутов предлагается алгоритм, базирующийся на величине вероятности ложной классификации FPR

Показано, что, задаваясь вероятностью ложной классификации FPR могут быть оценены основные метрики, характеризующие качество классификации, $T_{об}$; $T_{тест}$; Precision; Recall; Accuracy; F-measure.

Литература

1. Шелухин О.И., Ерохин С.Д., Ванюшина А.В. Классификация IP-трафика методами машинного обучения. М.: Горячая линия — Телеком, 2018. 276 с.
2. Шелухин О.И., Симонян А.Г., Ванюшина А.В. Эффективность алгоритмов выделения атрибутов в задачах классификации приложений при интеллектуальном анализе трафика // Электросвязь. 2016. № 11. С. 45–52.

3. Шелухин О.И., Симонян А.Г., Ванюшина А.В. Влияние структуры обучающей выборки на эффективность классификации приложений трафика методами машинного обучения // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Т. 11. № 2. С. 25–31.

4. Щербаклова Н.Г. Анализ IP-трафика методами Data Mining // Пробл. информатики. 2012. № 4. С. 30–46.

5. Барсегян А. А., Куприянов М. С., Степаненко В. В., Холод И.И. Технологии анализа данных: Data Mining, Visual Mining, Text Mining, Olap. СПб.: БХВ-Петербург, 2007. 384 с.

6. Jamuna A., Vinodh Edwards S. E. Efficient Flow based Network Traffic Classification using Machine Learning // International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA). 2013. Vol. 3. Issue 2. Pp.1324–1328.

7. Park B.C., Win Y.J., Kim M.S., Hong J.W. Towards automated application signature generation for traffic identification // Proceedings of the International Conference on Network operations and management symposium (Salvador, Bahia, Brazil, 7–11 April 2008). IEEE, 2008. Pp.160–167.

8. Szabo G., Orincsay D., Malomsoky S., Szabo I. On the validation of traffic classification algorithms // Proceedings of the 9th International Passive and Active Measurement conference (Cleveland, OH, USA, April 29–30, 2008). Berlin: Springer-Verlag, 2008. Pp.72–81.

9. Kohavi R., John G.H. Wrappers for feature subset selection // Artificial Intelligence. 1997. Vol. 97. Pp. 273–324.

10. Coates A., Carpenter B., etc. Text Detection and Character Recognition in Scene Images with Unsupervised Feature Learning. URL: <https://crypto.stanford.edu/~dwu4/papers/ICDAR2011.pdf> (дата обращения 15.01.2019).

11. Moore A. W. Information Gain tutorial. URL: <http://www.autonlab.org/tutorials/infogain11.pdf> (дата обращения 15.01.2019).

12. Hall M.A. Correlation-based feature selection for machine learning. Ph.D. dissertation, University of Waikato, Hamilton, New Zealand, 1998. 198 p.

13. Хэшимми С., Коматинэни С., Маклин Д. Разработка приложений для Android: пер с англ. СПб.: Питер, 2011. 736 с. ISBN 978–5–459–00530–1.

14. Карпова И.П. Базы данных. Курс лекций и материалы для практических занятий. СПб.: Питер, 2013. 240 с.

15. Kumano Y., Ata S., Nakamura N., Nakahira Y., Oka I. Towards real-time processing for application identification of encrypted traffic // Proceedings of the 2014 International Conference on Computing, Networking and Communications, ICNC (Honolulu, Hawaii, USA, 03–06 Февраля 2014 г.). IEEE, 2014. Pp. 136–140.



COMPARATIVE ANALYSIS OF THE ALGORITHMS FOR ASSESSING THE QUANTITY AND STRUCTURE OF ATTRIBUTES IN THE PROBLEMS OF CLASSIFICATION OF MOBILE APPLICATIONS

OLEG I. SHELUHIN,

Moscow, Russia, sheluhin@mail.ru

VIACHESLAV V. BARKOV,

Moscow, Russia, viacheslav.barkov@gmail.com

MIKHAIL V. POLKOVNIKOV,

Moscow, Russia, mnxamoto@mail.ru

KEYWORDS: classification; validity; DataMining; attributes; Random Forest; metrics; protocol.

ABSTRACT

To assess the effectiveness of classification algorithms in the training and testing modes, a database of mobile applications for traffic, WEB (http, https), mail (SMTP, IMAP), Skype (TCP, UDP), etc. was developed using the developed software and hardware complex.

Of the traffic streams received, 66% of the source data was used for training, the rest for testing the classification algorithms for selected applications using machine-learning methods. The following algorithms were considered as classification algorithms: Random Forest, C4.5, SVM, Adaboost, and Naive Bayes. To justify the choice of the number of classification attributes, the wrapping and filtering methods were used. It is shown that some attributes used to classify traffic do not carry meaningful information, and their use does not significantly affect the classification efficiency. Algorithms for the selection of classification attributes are considered: PCA, InfoGain, CFS, and Wrapper. It is shown that the use of the attribute selection-wrapping algorithm is a resource-intensive computational operation, which, with a large number of attributes, takes a long time. It is shown that among the considered classification algorithms, preference should be given to the C4.5 algorithm. A comparative analysis of the selection algorithms for the informative attributes of mobile applications has shown that the most efficient and easily implemented is the InfoGain algorithm. A specific feature of the classification of mobile applications is the high information content of only a few attributes. When choosing a method for selecting attributes, the most preferred algorithm is to select the most informative attribute first and add the following less informative attributes to it. For a quantitative assessment of the selection of the number of attributes, a selection algorithm based on their information content is proposed.

REFERENCES

1. Sheluhin O.I., Yerokhin S.D., Vanyushina A.V. *Klassifikatsiya IP-trafika metodami mashinnogo obucheniya* [Classification of IP-traffic methods of machine learning]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2018. 276 p.
2. Sheluhin O.I., Simonyan A.G., Vanyushina A.V. Algorithms efficiency for attributes isolation in applications classification problem with intelligent traffic analysis. *Elektrosvyaz'* [Telecommunication]. 2016. No. 11. Pp. 45-52.
3. Sheluhin O.I., Simonyan A.G., The influence of the structure of the training sample on the effectiveness of the classification of traffic applications by machine learning methods. *T-Comm*. 2017. Vol. 11. No. 2. Pp. 25-31.
4. Shcherbakova N.G. Analiz IP-trafika metodami Data Mining [Analysis of IP traffic using Data Mining methods]. *Problems of informatics*. 2012. No. 4. Pp. 30-46.
5. Barsegyan A. A., Kupriyanov M.S., Stepanenko V.V., Kholod I.I. *Tekhnologii analiza dannykh: Data Mining, Visual Mining, Text Mining, Olap* [Data Analysis Technologies: Data Mining, Visual Mining, Text Mining, Olap]. St. Petersburg: BKhV-Peterburg, 2007. 384 p.
6. Jamuna A., Vinodh Edwards S.E. Efficient Flow based Network Traffic Classification using Machine Learning. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*. 2013. Vol. 3. Issue 2. Pp.1324-1328. ISSN: 2248-9622
7. Park B.C., Win Y.J., Kim M.S., Hong J.W. Towards automated application signature generation for traffic identification. *Proceedings of the International Conference on Network operations and management symposium (Salvador, Bahia, Brazil, 7-11 April 2008)*. IEEE, 2008. Pp. 160-167.

8. Szabo G., Orincsay D., Malomsoky S., Szabo I. On the validation of traffic classification algorithms. *Proceedings of the 9th International Passive and Active Measurement conference (Cleveland, OH, USA, April 29-30, 2008)*. Berlin: Springer-Verlag, 2008. Pp. 72-81.

9. Kohavi R., John G.H. Wrappers for feature subset selection. *Artificial Intelligence*. 1997. Vol. 97. Pp. 273-324.

10. Coates A., Carpenter B., etc. Text Detection and Character Recognition in Scene Images with Unsupervised Feature Learning. URL: <https://crypto.stanford.edu/~dwu4/papers/ICDAR2011.pdf> (date of access: 15.01.2019).

11. Moore A.W. Information Gain tutorial. URL: <http://www.autonlab.org/tutorials/infogain11.pdf> (date of access:15.01.2019).

12. Hall M.A. Correlation-based feature selection for machine learning. Ph.D. dissertation, University of Waikato, Hamilton, New Zealand, 1998. 198 p.

13. Hashimi S., Komatineni S. MacLean D. *Pro Android 2*. Apress, 2010. 736 p. ISBN 978-1-4302-2659-8.

14. Karpova I.P. *Bazy dannykh. Kurs lektsiy i materialy dlya prakticheskikh zanyatiy* [Database. A course of lectures and materials for practical training]. St. Petesburg: Piter, 2013. 240 p.

15. Kumano Y., Ata S., Nakamura N., Nakahira Y., Oka I. Towards real-time processing for application identification of encrypted traffic. *Proceedings of the 2014 International Conference on Computing, Networking and Communications, ICNC (Honolulu, Hawaii, USA, 03-06 february 2014)*. IEEE, 2014. Pp. 136-140.

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Sheluhin O.I., PhD, Professor, Head of the Department of Information Security of the Moscow Technical University of Communications and Informatics;

Barkov V.V., Senior lecturer of the Department of Information Security of the Moscow Technical University of Communications and Informatics;

Polkovnikov M.V., Master of the Department of Information Security of the Moscow Technical University of Communications and Informatics.

For citation: Sheluhin O.I., Barkov V.V., Polkovnikov M.V. Comparative analysis of the algorithms for assessing the quantity and structure of attributes in the problems of classification of mobile applications. *H&ES Research*. 2019. Vol. 11. No. 2. Pp. 90-100. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10263 (In Russian)

