

## НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ЗЕМЛИ

Научно-технический журнал

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: • 01.01.00 Математика • 05.11.00 Авиационная и ракетно-космическая техника • 05.11.00 Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы • 05.12.00 Радиотехника и связь • 05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление.

**Учредитель:** ООО «ИД Медиа Паблшер». **Издатель:** СВЕТЛАНА ДЫМКОВА. **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.

Язык публикаций: русский, английский.

Периодичность выхода – 6 номеров в год.

**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; **КИРПАНЕВ А.В.**, д.т.н., доцент; **КУРНОСОВ В.И.**, д.т.н., профессор, академик Арктической академии наук, член-корреспондент Международной академии информатизации, академик Международной академии обороны, безопасности и правопорядка, 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; **СИНИЦЫН Е.А.**, д.т.н., профессор; **ШАТРАКОВ Ю.Г.**, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ.

**Адрес редакции:** 111024, Россия, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8, офис 512-514; 194044, Россия, СПб, Лесной Проспект, 34-36, к. 1, Тел.: +7(911) 194-12-42.

Отдел развития и рекламы: Ольга Дорошкевич, ovd@media-publisher.ru, тел.: 8(916) 951-55-36.

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](mailto:HT-ESResearch@yandex.ru). С требованиями можно ознакомиться на сайте: [www.H-ES.ru](http://www.H-ES.ru).

Все номера журнала находятся в свободном доступе на сайте.

© ООО «ИД Медиа Паблшер» 2017

## HIGH TECHNOLOGIES IN EARTH SPACE RESEARCH

Scientific and Technical Journal

# H&ES

RESEARCH

Том 9, № 5-2017

**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: • 01.01.00 Mathematics • 05.07.00 Aviation, space-rocket hardware • 05.11.00 Instrument engineering, metrology and information-measuring devices and systems • 05.12.00 RF technology and communication • 05.13.00 Informatics, computer engineering and control.

**Founder:** "Media Publisher", LLC. **Publisher:** SVETLANA DYMKOVA.

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.

Language of publications: Russian, English.

Periodicity – 6 issues per year.

**Editor in chief:** KONSTANTIN LEGKOV

**Editorial board:** **BOBROWSKY V.I.**, Ph.D., associate professor; **BOBOROV V.V.**, Ph.D., professor; **BUDKO P.A.**, Ph.D., professor; **BUDNIKOV S.A.**, Ph.D., associate professor, Actual Member of the Academy of Education Informatization; **VERHOVA G.V.**, Ph.D., professor; **GONCHAREVSKY V.S.**, Ph.D., professor, Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation; **KOMASHINSKIY V.I.**, Ph.D., professor; **KIRPANEEV A.V.**, Ph.D., associate professor; **KURNOSOV V.I.**, Ph.D., professor, Academician of Academy of Sciences of the Arctic, corresponding member of the International Academy of Informatization, International Academy of defense, security, law and order, Member of the Academy of Natural Sciences; **MANUILOV Y.S.**, Ph.D., professor; **MOROZOV A.V.**, Ph.D., professor, Actual Member of the Academy of Military Sciences; **MOSHAK N.N.**, Ph.D., associate professor; **PROROK V.Y.**, Ph.D., professor; **SEMEENOV S.S.**, Ph.D., associate professor; **SINICYN E.A.**, Ph.D., professor; **SHATRAKOV Y.G.**, Ph.D., professor, Honored Worker of Science of the Russian Federation.

**Address of edition:** 111024, Russia, Moscow, st. Aviamotornaya, 8, office 512-514; 194044, Russia, St. Petersburg, Lesnoy av., 34-36, h.1, Phone: +7 (911) 194-12-42.

Development and advertising department: Olga Doroshkevich, ovd@media-publisher.ru, tel.: 8(916) 951-55-36.

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](mailto:HT-ESResearch@yandex.ru). The requirements are available on the website: [www.H-ES.ru](http://www.H-ES.ru).

All issues of the journal are in a free access on a site.

© "Media Publisher", LLC 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

### АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

**Павлов А. Н., Павлов Д. А., Слинько А. А.**

Структурно-параметрический синтез системы информационного взаимодействия кластера перспективных малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли и оценка ее робастности ..... 6

**Сулейманов Т. И., Мамедов И. Э.**

Информационный метод калибровки и валидации спутниковых данных с помощью беспилотных летательных аппаратов ..... 19

**Ягольников Д. В., Шароглазов В. Б., Григорашенко И. А., Филатов А. В.**

Методика построения и расчета интегрированной динамической сетевой модели процессов технического обслуживания и войскового ремонта образцов вооружения и военной техники Воздушно-космических сил ..... 26

### ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

**Гусеница Я. Н., Кравцов А. Н., Малахов А. В.**

Метод оценивания влияния метрологического обеспечения на эффективность применения вооружения, военной и специальной техники ..... 33

### РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

**Варламов О. В., Варламов В. О.**

Распределение максимальных уровней атмосферных радишумов в диапазонах низких частот и средних частот по территории Земли ..... 42

**Мартынова Л. А., Гриненков А. В., Пронин А. О., Куликовских Ю. В.**

Исследование функционирования мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата с помощью имитационного моделирования ..... 52

### ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

**Багутдинов Р. А.**

Принцип разработки алгоритмического обеспечения системы технического зрения роботов ..... 66

**Охтилев П. А., Бахмут А. Д., Крылов А. В., Охтилев М. Ю., Соколов Б. В.**

Подход к оцениванию структурных состояний сложных организационно-технических объектов на основе обобщенных вычислительных моделей ..... 73

### ПУБЛИКАЦИИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

**Легков К. Е., Левко И. В.**

Системный подход к организации управления информационными подсистемами автоматизированных систем управления сложными объектами специального назначения ..... 84

**Лернер И. М., Камаллетдинов Н. Н.**

К вопросу увеличения скорости передачи в фазовых радиотехнических системах передачи информации, работающих при сильных межсимвольных искажениях в линейном радиотракте ..... 92

## CONTENTS

### AVIATION, SPACE-ROCKET HARDWARE

**Pavlov A. N., Pavlov D. A., Slin'ko A. A.**

Structural-parametric synthesis of the system of information interaction of a cluster of perspective small satellites of remote sensing of the earth and the evaluation of its robustness ..... 6

**Suleymanov T. I., Mamedov I. E.**

Information method for calibration and validation of satellite data using drones ..... 19

**Yagolnikov D. V., Sharoglazov V. B., Grigoraschenko I. A., Filatov A. V.**

Method of construction and calculation of integrated dynamic network model of processes of technical maintenance and airborne repair of samples of Aerospace Forces ..... 26

### INSTRUMENT, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES AND SYSTEMS

**Gusenitsa Y. N., Kravtsov A. N., Malakhov A. V.**

Method of estimation of influence of metrological support on efficiency of application of armament, military and special equipment ..... 33

### RF TECHNOLOGY AND COMMUNICATION

**Varlamov O. V., Varlamov V. O.**

Distribution of maximum levels of atmospheric radio noise in LF and MF ranges in the territory of the Earth ..... 42

**Martynova L. A., Grinenkov A. V., Pronin A. O., Kulikovskikh J. V.**

Research of the functioning of a multi-agent control system for an autonomous underwater vehicle using simulation ..... 52

### INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

**Bagutdinov R. A.**

Principle of development of algorithmic support of the system of technical vision of robots ..... 66

**Okhtilev P. A., Bakmut A. D., Krylov A. V., Okhtilev M. Yu., Sokolov B. V.**

Approach to estimation of structural states of complex organizational and technical objects based on generalized computational models ..... 73

### PUBLICATIONS IN ENGLISH

**Legkov K. E., Levko I. V.**

System approach to organization of control of information subsystems of automated control systems for complex objects of special purpose ..... 84

**Lerner I. M., Kamalietdinov N. N.**

To a question of increasing the data transmission rate of phase radio-technical data transmission systems operating under strong intersymbol interference in linear radio path ..... 92

## ЦИФРОВАЯ РЕАЛЬНОСТЬ

14-15 сентября в Петербурге с успехом прошло крупнейшее отраслевое мероприятие – III Федеральный ИТ-форум нефтегазовой отрасли России «Smart Oil & Gas: Цифровая трансформация нефтегазовой индустрии». Организаторами мероприятия стали информационная группа ComNews в партнерстве с ООО «ИТСК». Генеральным партнером форума выступило ПАО «Газпром нефть», платиновым спонсором SAP СНГ, золотым спонсором АО «Лаборатория Касперского», серебряными спонсорами IBM и Microsoft, бронзовыми спонсорами ProSoft, Hewlett Packard Enterprise, Intel, VMware, Veeam, Lenovo, Cisco и EY. Спонсором регистрации выступил Orange Business Services, спонсором вечернего приема Dell EMC, телеком-партнером – ПАО «МегаФон». Спонсорами сессий ИТ-форума стали компании: АО «Газпром космические системы», IBS, Корпорация «Галактика», Accenture, ЗАО «ИНЛАЙН ГРУП», ООО «РДП.РУ», Comindware, АйТи Смарт Системы, АО «Транстелеком», Detecon International GmbH. Мероприятие прошло при участии: ICONICS, ОАО «СУПЕРТЕЛ», General Electric, Postgres Professional, Контроль ИТ, Polymedia, ЭР-Телеком Холдинг, CompTek, Ixia Solutions Group (Keysight Technologies), Росплатформа. Генеральными участниками выставки стали: Группа компаний ITPS, Фирма 1С, специальными участниками выставки – FASTWEL, RAMAX Group, Тринити, ПАО «Ростелеком». На площадке ИТ-форума также была организована выставка, участниками которой стали компании: CommScope, Raisecom, Polymedia, Visiology, RDP.RU, Veeam, CompTek, Ixia Solutions Group (Keysight Technologies), ООО «Автоматика-сервис» (Технопарк промышленной авто-



матизации «Газпром нефти»); в зоне «Цифровая трансформация» представили свои решения АО «Лаборатория Касперского», ООО «ИТСК», компания «ЭлеСи» и ГК «НЕОЛАНТ». ИТ-форум также поддержали: Международная Академия Связи, Ассоциация профессиональных бухгалтеров, Ассоциация профессионалов управления бизнес-процессами, Ассоциация «АСТРА», Ассоциация интернета вещей, Национальная Ассоциация участников рынка промышленного интернета, Ассоциация поставщиков нефтегазовой промышленности «Созвездие», АРПП «Отечественный софт», Ассоциация Предприятий Компьютерных и Информационных Технологий (АП КИТ), Ассоциация придорожного сервиса, ритейла и туризма.

Константин Кравченко, начальник Департамента информационных технологий, автоматизации и телекоммуникаций ПАО «Газпром нефть» обратился к участникам форума с приветственным словом: «Мы находимся в мейнстриме, и цифровизация входит в нефтегазовую отрасль уверенными темпами».

На панельной дискуссии, посвященной цифровой трансформации нефтегазовой индустрии, спикеры обсудили важнейшие вопросы: пла-

ны нефтегазовых компаний по трансформации бизнеса, промышленный интернет вещей, информационную безопасность и импортозамещение.

Следующая сессия была посвящена цифровой трансформации и адаптации подходов «Индустрия 4.0» к потребностям нефтегазовой отрасли и российской специфике.

Темой послеобеденной сессии стали прогностические методы управления в Upstream и Downstream: IIoT, когнитивные технологии и элементы искусственного интеллекта.

Последняя сессия «Когда и как нефтегазовые компании превратятся в Real-Time Enterprise» прошла в формате форсайт.

Деловая программа второго дня «Smart Oil & Gas: Цифровая трансформация нефтегазовой индустрии» была очень насыщенной – одновременно работали две параллельные сессии.

Так, сессия 4 была посвящена корпоративным информационным системам, поиску новых подходов и нетривиальных решений.

Основной темой первой специальной сессии стали новые телекоммуникационные технологии (облака, IoT и 5G) для нужд нефтегазовых компаний.

В пятой сессии участники подробно рассмотрели ИТ как инструмент

повышения эффективности работы Upstream.

На второй специальной сессии участники обсудили практические примеры внедрений на пути к заправке будущего (цифровой АЗС).

Третья специальная сессия, вызвавшая особенный интерес делегатов, была посвящена «роботам-убийцам» и вопросам, что делать с сотрудниками, которых заменяют роботы и боты, а также системы автоматизации.

Третий ИТ-форум в нефтегазовом секторе стал крупнейшим в истории этого мероприятия – более 500 делегатов со всего мира прибыло на это событие. Делегаты отметили высокий уровень организации, отличную деловую и развлекательную программу.

## COMNEWS НАГРАДИЛ ИТ-ГЕРОЕВ НЕФТЕГАЗА

ComNews вручил награды лауреатам IX конкурса «Лучшие 10 ИТ-проектов для нефтегазовой отрасли». Торжественная церемония награждения победителей состоялась 14 сентября 2017 г. на сцене Большого Парадного зала Центрального музея связи имени А.С. Попова в Санкт-Петербурге. Спонсором вечернего приема выступила компания Dell EMC, а образовательным партнером церемонии стал Московский технологический институт (МТИ).

Конкурс «Лучшие 10 ИТ-проектов для нефтегазовой отрасли» был учрежден ГК ComNews в 2009 г. и ежегодно отмечает как заказчиков, так и исполнителей самых значимых проектов в области ИТ, вносящих инновации как в работу отдельных ведомств, госструктур, коммерческих заказчиков, так и в экономику страны в целом. Основные критерии оценки ИТ-решений, которыми руководствовалась конкурсная комиссия (жюри) – масштабируемость (проект можно тиражировать), инновационность/сложность (проект при-

нес инновации в работу компании, в проекте использовались новые или значительно обновленные технологические решения), значимость для сообщества ИТ-директоров, эффективность (повышение рентабельности предприятия) и прозрачность.

Награду в номинации «Цифровое месторождение» завоевала компания Dreamline за проект по разработке и внедрению системы «Цифровое месторождение» в АО «ЭмбаМунайГаз».

В номинации «Цифровой завод» победителем стала компания «АйТи Юниверс» за проект по разработке и внедрению специализированного приложения и системы онлайн-мониторинга показателей производства и эффективности для АО «Рязанская нефтеперерабатывающая компания».

За внедрение в сфере промышленного Интернета вещей премию получила «Энфорта» – «дочерняя» компания «ЭР-Телеком Холдинга». Жюри отметило проект «Энфорты» по цифровизации скважин компании «Волгодеминойл» на основе IoT-среды по технологии LoRaWAN и облачной платформы работы с данными AVIST.Operation.

В категории «Информационная безопасность» победителем стало Научно-производственное предприятие «Информационные технологии в бизнесе» за проект по созданию комплексной системы защиты информации «Панцирь+» для ОС Microsoft Windows.

Компания «Мобильные решения для строительства» забрала награду в номинации «Облачное решение» – за облачное решение для технического надзора на строительстве Комплекса нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов «ТАНЕКО» в Нижнекамске.

В номинации «Прогностическое обслуживание производственного оборудования» победителем стала корпорация «Галактика» за проект по созданию автоматизированной системы учета состояния и ремонтов



на базе информационной системы «Галактика ЕАМ».

За управление активами и оптимизацию ресурсов жюри отметило наградой компанию «Мелстон» – за проект по разработке и внедрению автоматизированной системы управления сервисной службой.

В категории «Промышленная автоматизация: усовершенствованные АСУ ТП и системы управления производственными процессами» победила компания «НЕОЛАНТ» – за проект по созданию цифрового актива объектов обустройства Новопортовского месторождения для сквозной информационной поддержки проектирования, строительства и эксплуатации

Награду в номинации «Специализированное программное решение для нефтегазовой отрасли» завоевала компания Gridpoint Dynamics за проект по разработке и внедрению в дочерние организации ПАО «Газпром» отечественной программной платформы Geoplant Pro для решения полного комплекса инженерных задач от поиска до разработки нефтегазовых месторождений, а также снижения рисков, обеспечения промышленной безопасности, экономики капитальных и текущих затрат в рамках программы импортозамещения.

# СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КЛАСТЕРА ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ И ОЦЕНКА ЕЕ РОБАСТНОСТИ

**ПАВЛОВ**

**Александр Николаевич<sup>1</sup>**

**ПАВЛОВ**

**Дмитрий Александрович<sup>2</sup>**

**СЛИНЬКО**

**Алексей Алексеевич<sup>3</sup>**

---

<sup>1</sup>д.т.н., доцент, профессор  
Военно-космической академии  
имени А.Ф.Можайского,  
г. Санкт-Петербург, Россия,  
pavlov62@list.ru

<sup>2</sup>к.т.н., начальник 551 лаборатории  
Военно-космической академии  
имени А.Ф.Можайского,  
г. Санкт-Петербург, Россия,  
dpavlov239@mail.ru

<sup>3</sup>адъюнкт Военно-космической академии  
имени А.Ф.Можайского,  
г. Санкт-Петербург, Россия,  
thebestman\_leshka@mail.ru

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** дистанционное зондирование Земли; кластер малых космических аппаратов; информационное взаимодействие; структурно-параметрический синтез; робастность системы информационного взаимодействия.

**АННОТАЦИЯ**

Работа посвящена исследованиям в рамках активно развивающегося в настоящее время направления в ракетно-космической отрасли, связанного с созданием и применением перспективных малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли и современных орбитальных группировок на их основе. При этом функционирование малых космических аппаратов осуществляется в составе так называемых кластеров. Актуальным является вопрос о рациональном и эффективном информационном взаимодействии малых космических аппаратов в составе кластера при выполнении целевых задач. В связи с этим в статье рассмотрены вопросы планирования работы системы информационного взаимодействия кластера перспективных малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. Разработана оригинальная модель планирования работы системы информационного взаимодействия кластера перспективных малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, позволяющая находить планы, повышающие производительность кластера с учетом его структурной динамики и прогнозируемых возмущений внешней среды. На основе анализа полученных планов разработаны подход, модель и методика структурно-параметрического синтеза системы информационного взаимодействия кластера малых космических аппаратов, позволяющие осуществлять выбор рациональных технологий выполнения операций информационного взаимодействия малых космических аппаратов с учетом баланса их энергетических затрат. Проводится оценка робастности системы информационного взаимодействия кластера перспективных малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, которая основана на построении и аппроксимации в критериальном пространстве области образов планов работы системы информационного взаимодействия кластера малых космических аппаратов для случая интервально-заданных возмущающих воздействий средств радиоэлектронного подавления. Это позволяет сократить затраты времени на принятие решений по рациональному распределению ресурсов в кластере малых космических аппаратов в условиях возмущающих воздействий. Предложены наглядные способы представления результатов исследований робастности системы информационного взаимодействия, используя которые возможно выбирать наиболее предпочтительные планы работы кластера малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли.

---

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Павлов А.Н., Павлов Д.А., Слинко А.А. Структурно-параметрический синтез системы информационного взаимодействия кластера перспективных малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли и оценка ее робастности // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 5 С. 6-18.

## Введение

Применение перспективных малых космических аппаратов (МКА) и космических систем на их основе является в настоящее время одной из ведущих тенденций развития мировой космической отрасли. Орбитальные группировки МКА, имеющие динамически изменяющуюся сетевую структуру, могут быть многофункциональными и реконфигурируемыми для выполнения оперативных целевых задач, дешевыми в исполнении, надежными и живучими в самых различных ситуациях при наблюдении объектов на Земле, исследовании объектов в космическом пространстве, решении телекоммуникационных и других разнообразных задач информационного обеспечения [13]. Наиболее востребованным направлением использования МКА в настоящее время является дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ). В связи с этим ведущие корпорации ракетно-космической отрасли ведут разработку и реализацию различных программ создания орбитальных систем ДЗЗ с использованием современного бортового оборудования многоспектрального зондирования. Для реализации выполнения целевых задач зондирования Земли большой интерес представляют разработки МКА, оснащенных разнотипной целевой аппаратурой, работающей в гиперспектральном, оптическом и инфракрасном диапазонах [4].

Для снижения сроков разработки и внедрения бортовой специальной и обеспечивающей аппаратуры перспективных МКА проводится их унификация и миниатюризация с применением новейших интеллектуальных информационных технологий [7]. Для реализации преимуществ и системных эффектов перспективные МКА функционируют в составе целевых подсистем орбитальной группировки, получивших в специальной литературе наименование кластеров МКА. Под *кластером МКА ДЗЗ* в данном случае понимается распределенная орбитальная система сетевой архитектуры, состоящая из нескольких (более 4-х) разнотипных МКА ДЗЗ, имеющая определенное орбитальное построение, совместно и согласованно выполняющая съемку земной поверхности в интересах заказчика [8]. Многоспутниковые орбитальные системы наблюдения позволяют получить эффекты недоступные одиночным КА, например, обеспечение более высокой информативности съемки объектов, многопозиционность наблюдения любого региона Земли. Так маломассогабаритные оптико-электронные и радиолокационные КА (на основе унифицированной платформы SSTL-300) и наноспутники Cube Sat, разработанные корпорациями SSTL и Skybox Imaging, являются одними из главных поставщиков информационных продуктов для военных и гражданских заказчиков. Поэтому наиболее современной тенденцией является использование для решения задач ДЗЗ в интересах различных ведомств кластеров перспективных МКА ДЗЗ, оснащенных специальной аппаратурой различного назначения.

Для повышения устойчивости и эффективности их функционирования в различных условиях обстановки управление должны быть ориентировано главным образом на достижение общесистемного эффекта путём рационального использования имеющейся структурно-функциональной избыточности всей системы в целом [2,14]. При этом одной из главных проблем создания многоспутниковых космических систем на основе перспективных МКА является разработка систем управления, позволяющих гибко реагировать на структурные изменения кластера и при этом обеспечивающих его устойчивое функционирование. Дополнительная особенность задачи управления кластером перспективных МКА ДЗЗ состоит в том, что наряду с структурно-функциональной избыточностью и структурной динамикой, присущих ему при выполнении целевых задач, необходимо осуществлять управление его системой информационного взаимодействия. Таким образом решаемая в статье задача планирования работы системы информационного взаимодействия (ИВ) кластера перспективных МКА ДЗЗ представляется актуальной.

## Постановка задачи

На основе анализа особенностей функционирования кластера перспективных МКА ДЗЗ произведена постановка задачи на теоретико-множественном уровне. В результате проведения анализа функционирования кластера перспективных МКА ДЗЗ были выявлены следующие особенности, которые необходимо учитывать при планировании работы его системы ИВ [2]: а) структурная динамика; б) неоднородность структуры ИВ; в) вариативность режимов функционирования; г) разнотипность информационных потоков; д) первичное комплексирование и сжатие информационных потоков на борту перспективных МКА; е) необходимость управления информационными и энергетическими ресурсами кластера МКА ДЗЗ (интенсивностью приема/передачи информации; загрузкой бортовых вычислителей и запоминающих устройств; расходом энергетических ресурсов).

На основании результатов проведенного системного анализа, на содержательном уровне суть решаемой задачи планирования работы системы ИВ кластера перспективных МКА ДЗЗ сводится к следующему: необходимо найти план работы системы ИВ, обеспечивающий оптимальную результативность (баланс пропускной способности и энергопотребления) кластера МКА в динамически изменяющихся условиях, для которого были бы выполнены все основные пространственно-временные, технические и технологические ограничения, а выбранные показатели качества планирования принимали бы экстремальные значения. В соответствии с концептуальной моделью для дальнейшей формализации указанного динамического изменения структуры системы ИВ кластера МКА введен

в рассмотрение динамический взвешенный мультиграф (ДВМ) следующего вида:

$$G(\omega, t) = \langle X(\omega, t), E(\omega, t), W(\omega, t) \rangle, t \in (t_0, t_f], \omega \in \Omega$$

где  $X(t) = \{A_i(t), i \in N\}$  — множество перспективных МКА;

$E(t) = \{e_{ij\rho}(t), i, j \in N, \rho \in P\}$  — множество информационных связей между МКА;

$W(t) = \{w_{ij\rho d}(t), i, j \in N, \rho \in P, d \in D, o \in O\}$  — множество значений параметров, количественно характеризующих соответствующие МКА;

$Y_i(t)$  — объем запоминающего устройства, установленного на  $A_i(t)$ ;

$\Psi_{i\rho o}(t)$  — интенсивность обработки информации  $\rho$ -го типа на  $A_i(t)$ ;

$\varpi_{ij\rho d}(t)$  — интенсивность передачи информации  $\rho$ -го типа от  $A_i(t)$  к  $A_j(t)$ ;

$E_i(t)$  — объем аккумуляторных батарей, установленных на  $A_i(t)$ ;

$\Phi_{i\rho_0}(t)$  — интенсивность поступления энергетического потока на  $A_i(t)$ .

В рамках теоретико-множественной постановки задачи введено множество допустимых планов ИВ кластера перспективных МКА ДЗЗ с учетом основных ограничений, связанных с особенностями и технологиями его целевого функционирования, в виде

$$\Delta_{\mu\beta} = \left\{ U_\mu = \|x_\mu, g_\mu, y_\mu, z_\mu, r_\mu, t_\mu^g, t_\mu^x\| \geq \|0\| \left\{ r_1^\beta, r_2^\beta, r_3^\beta, r_4^\beta \right\} \right\}.$$

Заданы частные показатели эффективности ИВ кластера перспективных МКА ДЗЗ (энергозатрат, суммарных объемов доставленной, сохраненной информации, обработанной информации и др.)  $\{F_h(U_\mu), U_\mu \in \Delta_{\mu\beta}\}_{h \in H}$ , а также  $\{\Phi^k\}_{k \in \Gamma}$  — множество согласующих правил, позволяющих задавать результирующее отношение предпочтения задачи планирования работы системы ИВ кластера перспективных МКА.

С учетом вышесказанного структурно-математическое описание рассматриваемой задачи можно представить в следующем виде (1).

$$\left( \left\{ G(t) \right\}_{t \in T=(t_0, t_f]}, \Delta_{\mu\beta}, \left\{ F_h \right\}_{h \in H}, \left\{ \Phi^k \right\}_{k \in \Gamma} \right) \quad (1)$$

Таким образом, задача планирования работы системы ИВ кластера перспективных МКА ДЗЗ сводится к определению множества наилучших с точки зрения заданных отношений предпочтения альтернатив (планов). В сложных ситуациях выбора с множественным предпочтением первым шагом решения является выделение множества недоминируемых альтернатив, т.е. множества Парето [3], а выбор конкретной альтернативы  $U^*$  (оптимального или рационального плана) должен осуществляться из указанного множества.

## Модель планирования работы системы ИВ кластера перспективных МКА ДЗЗ

Решение рассматриваемой задачи заключается в планировании работы системы ИВ кластера перспективных МКА ДЗЗ. Тогда план работы системы ИВ  $U_\infty$  можно однозначно описать вектором, состоящим из семи соответствующих подвекторов  $x_\infty, g_\infty, y_\infty, z_\infty, r_\infty, t_\infty^g, t_\infty^x$ , следующим образом

$$U_\mu = \|x_\mu, g_\mu, y_\mu, z_\mu, r_\mu, t_\mu^g, t_\mu^x\| = \| \|x_{\mu ij\rho dk}\|, \|g_{\mu i\rho ok}\|, \|y_{\mu i\rho k}\|, \|z_{\mu i\rho k}\|, \|r_{\mu i\rho k}\|, \|t_{\mu i\rho ok}^g\|, \|t_{\mu ij\rho dk}^x\| \|,$$

где  $\|x_{\mu ij\rho dk}\|$  — объемы переданных потоков  $\rho$ -х типов (при  $\rho \neq \rho_0$ ) с  $i$ -х на  $j$ -е МКА по  $d$ -м технологиям на  $k$ -х интервалах постоянства структуры системы ИВ (далее интервалах), и объемы энергии, затраченной на осуществление данной передачи (при  $\rho = \rho_0$ );

$\|g_{\mu i\rho ok}\|$  — объемы потоков  $\rho$ -х типов, обработанных (в случае, когда  $o \in O_{\text{рвых}}$ ) или поступающих на обработку (в случае, когда  $o \in O_{\text{рвх}}$ )  $i$ -ми МКА;

$\|y_{\mu i\rho k}\|$  — объемы сохраненных потоков  $\rho$ -х типов  $i$ -ми МКА на  $k$ -х интервалах;

$\|z_{\mu i\rho k}\|$  — объемы не полученных (ввиду сложившихся условий функционирования кластера) извне потоков (при  $\rho \neq \rho_0$  — информационных, а при  $\rho = \rho_0$  — энергетических);

$\|r_{\mu i\rho k}\|$  — результирующие объемы информации доставленной  $i$ -ми МКА до потребителя;

$\|t_{\mu i\rho ok}^g\|$  — временные ресурсы, требующиеся для обработки информации  $i$ -м МКА по  $o$ -й технологии на  $k$ -м интервале;

$\|t_{\mu ij\rho dk}^x\|$  — временные ресурсы требующиеся для передачи информации с  $i$ -го на  $j$ -й МКА;

$d$  — индекс, определяющий вид используемой технологии;

$k$  — индекс интервала постоянства работы системы ИВ кластера МКА.

Решение  $U^*$  должно быть практически реализуемо, для чего оно должно удовлетворять условиям рассматриваемой задачи. Следовательно, была проведена формализация условий задачи в виде ограничений. Ограничения баланса информационных потоков представлены в виде (2).

$$\left( \sum_{d \in D_{\rho 2KE}} \sum_{j \in J_{\mu k 2KE}} x_{\mu ij\rho dk} - \sum_{d \in D_{\rho 2E}} \sum_{j \in J_{\mu k 2E}} x_{\mu ij\rho dk} \right) + (y_{\mu i\rho k} - y_{\mu i\rho(k-1)}) + \left( \sum_{o \in O_{\rho 2E}} g_{\mu i\rho ok} - \sum_{o \in O_{\rho 2KE}} g_{\mu i\rho ok} \right) + (z_{\mu i\rho k} + \chi_{\mu i\rho k} r_{\mu i\rho k} = I_{\mu i\rho k}, \quad (2)$$

$$\forall i, j \in N; k \in K; \chi_{\mu i\rho k} \in \{0; 1\}; \rho \in P \setminus \{\rho_0\}; \mu = 1, \dots, m,$$

Ограничения баланса энергетических потоков представлены в виде (3).



$$\sum_{d \in D_{\text{рвх}}} \sum_{j \in J_{\text{иовх}}} x_{\mu jpdk} + (y_{\mu ipk} - y_{\mu ip(k-1)}) + \sum_{o \in O_{\text{рвх}}} g_{\mu ipok} + z_{\mu ipk} = I_{\mu ipk}, \forall i, j \in N; \forall d \in D; \forall k \in K; \rho = \rho_0; \mu = 1, \dots, m, \quad (3)$$

Сформированы ограничения на обработку информации (4).

$$t_{\mu iok}^g \cdot V_{\rho o} - g_{\mu ipok} \cdot T_o = 0, \quad \forall k \in K; \forall i \in N; \forall o \in O; \forall \rho \in P \setminus \{\rho_0\}, \quad (4)$$

где при  $\forall \rho \in P_{\text{овх}}: P_{\text{овх}}$  — множество типов потоков, являющихся входными для обработки по  $o$ -й технологии, а при  $\forall \rho \in P_{\text{овых}}: P_{\text{овых}}$  — множество типов потоков, являющихся выходными после обработки по  $o$ -й технологии.

Заданы ограничения на передачу потоков информации между МКА кластера и до потребителя (5).

$$t_{\mu jdk}^x \cdot V_{\rho d} - x_{\mu jpdk} \cdot T_d = 0, \quad \forall k \in K; \forall i \in N; \forall d \in D; \forall \rho \in P \setminus \{\rho_0\}, \quad (5)$$

где при  $\forall \rho \in P_{\text{двх}}: V_{\rho d}$  — объем информации  $\rho$ -го типа передаваемой за время  $T_0$  согласно  $d$ -й технологии; при  $\forall \rho \in P_{\text{двых}}: V_{\rho d}$  — объем информации  $\rho$ -го типа переданной за время  $T_0$  по  $d$ -й технологии; при  $(\rho = \rho_0): V_{\rho d}$  — объем энергии, затрачиваемой за время  $T_0$  на передачу информации согласно  $d$ -й технологии.

В соответствии с методологией системного подхода также были заданы технические ограничения, накладываемые на работу системы ИВ кластера перспективных МКА ДЗЗ [9]. Ограничения на хранение информационных потоков и накопление энергетических потоков представлены (6) и (7) соответственно.

$$y \leq Y; \forall k \in K; \forall i \in N \quad (6)$$

$$y_{\mu ipk} \leq E_i; \forall k \in K; \forall i \in N; \rho = \rho_0 \quad (7)$$

Ограничения по времени выполнения операций ИВ представлены в виде (8) и (9) (соответственно, ограничения на время обработки информации, на время передачи информации).

$$\sum_{d \in D_{\text{рвх}}} \sum_{j \in J_{\text{иовх}}} \xi_{\mu}^{(x)} t_{ijpk}^x + \sum_{d \in D_{\text{рвх}}} \sum_{j \in J_{\text{иовх}}} \xi_{\mu}^{(x)} t_{jipdk}^x \leq T_k; \quad (8)$$

$$\forall k \in K; \forall i \in N; \rho \in P \setminus \{\rho_0\},$$

где  $\xi_{\mu}^{(x)}$  — коэффициент, характеризующий величину воздействия помех, устанавливаемых средствами радиоэлектронного подавления противника на работу бортовой аппаратуры приема-передачи данных МКА.

$$\sum_{o \in O} \xi_{\mu}^{(g)} t_{iok}^g \leq T_k; \forall k \in K; \forall i \in N; \rho \in P \setminus \{\rho_0\}, \quad (9)$$

где  $\xi_{\mu}^{(g)}$  — коэффициент, характеризующий аналогичные воздействия на работу бортовой вычислительной машины МКА.

При формировании плана работы системы ИВ кластера МКА ДЗЗ поиск наилучшего решения может осуществляться посредством оптимизации следующих обобщенных показателей ее информационных и энергетических возможностей:

$H_{1\mu} = \sum_{k \in K} \sum_{\rho \in P \setminus \{\rho_0\}} \sum_{i \in N} r_{\mu ipk}$  — объема всех переданных потоков многоспектральной информации ДЗЗ;

$H_{2\mu} = \sum_{k \in K} \sum_{\rho \in P \setminus \{\rho_0\}} \sum_{i \in N} z_{\mu ipk}$  — объема всех неполученных потоков информации ДЗЗ;

$H_{3\mu} = \sum_{k \in K} \sum_{\rho \in P \setminus \{\rho_0\}} \sum_{i \in N} y_{\mu ipk}$  — объема всех сохраненных потоков информации ДЗЗ;

$H_{4\mu} = \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} r_{\mu ip_0k}$  — объема энергетических затрат;

$H_{5\mu} = \sum_{k \in K} \sum_{\rho \in P \setminus \{\rho_0\}} \sum_{i \in N} g_{\mu ipk}$  — объема всех обработанных

потоков информации ДЗЗ.

Представленная интерпретация задачи планирования работы системы ИВ кластера МКА позволяет заключить, что для нахождения плана (планов)  $U_{\infty}^*$  необходимо разрешить имеющуюся критериальную неопределенность. Для этого были использованы лексикографические методы. Так как множество допустимых решений  $\Delta_{\beta}$  является выпуклым многогранным множеством, а критериальные функции решаемой задачи являются линейными, то для нахождения планов ИВ из области недоминируемых альтернатив была использована стандартная методика скаляризации векторного показателя в виде аддитивной свертки Лагранжа [6] и введен в модель интегральный критерий представленный в виде функции (10).

$$\beta_1 \left( \sum_{\rho \in P \setminus \{\rho_0\}} \sum_{i \in N} \sum_{k \in K} \alpha_1 r_{\mu ipk} - \sum_{\rho \in P \setminus \{\rho_0\}} \sum_{i \in N} \alpha_2 y_{\mu ipk} \right) - \beta_2 \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \alpha_3 r_{\mu ip_0k} \rightarrow \max, \quad (10)$$

где  $\beta_1 = \left( \sum_{k \in K} \sum_{\rho \in P \setminus \{\rho_0\}} \sum_{i \in N} I_{\mu ipk} \right)^{-1}$  — нормировочный коэффициент;

$\beta_2 = \left( \sum_{i \in N} Y_{i\rho_0} \right)^{-1}$  — нормировочный коэффициент;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  — соответствующие коэффициенты важности информационных и энергетических потоков. Выбор показателей результативности кластера МКА ДЗЗ проводился

в соответствии с методикой, представленной в работе [15]. Наиболее подробно представленная модель планирования показана в работе [10].

### Результаты экспериментов планирования работы системы ИВ кластера МКА ДЗЗ

Рассмотрим исходные данные которые использовались при планировании работы системы ИВ кластера МКА ДЗЗ «Канопус-В» [11]:

$$1. C = \{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5\} =$$

$$= \{60 \text{ min}, 120 \text{ min}, 180 \text{ min}, 60 \text{ min}, 90 \text{ min}\} — \text{множество интервалов постоянства системы ИВ кластера перспективных МКА ДЗЗ. Данные интервалы получены}$$

путем решения задачи поиска интервалов структуры кластера МКА ДЗЗ на основе баллистического прогноза движения центра масс МКА. Для решения такой задачи использовался подход предложенный в работе [1];

2. Состав кластера перспективных МКА ДЗЗ: шесть МКА ДЗЗ, при этом МКА под № 2,3 могут обрабатывать информационные потоки и передавать их потребителю, все МКА могут осуществлять съемку объектов в двух спектральных диапазонах, сохранять в запоминающих устройствах (ЗУ) данные зондирования и проводить информационное взаимодействие с другими МКА через двухсторонние каналы связи со скоростью до 50 Мбит/сек;

3. Характеристики МКА: каждый МКА имеет ЗУ объемом 16 Гбайт, аккумуляторные батареи объемом 360 Вт каждая.

4. Режимы работы перспективных МКА ДЗЗ: «Эко (Э)» — низкая интенсивность выполнения операций ИВ  $\omega_{ip0} = 17$  Мбит/сек; «Максимальный (М)» — высокая интенсивность выполнения операций ИВ  $\omega_{ip0} = 50$  Мбит/сек.

5. Значения коэффициентов важности, заданных в соответствии с предпочтениями ЛПР: а) передачи потоков многоспектральной информации ДЗЗ заказчику —  $\alpha_1 = 0,55$ ; б) сохранения информационных потоков в ЗУ МКА —  $\alpha_2 = 0,30$ ; в) расхода энергетических потоков —  $\alpha_3 = 0,15$ .

На основе анализа полученных в результате проведения расчетов планов работы системы ИВ был предложен новый режим «Комбинированный (К)» с нефиксированной интенсивностью выполнения операций ИВ  $17 \leq \omega_{ip0} \leq 50$  Мбит/сек, заключающийся в совмещении на программном уровне двух первых режимов М и К, при этом система может выбирать самостоятельно параметры работы МКА (т.е. варьировать значения интенсивностей для каждого интервала постоянства в соответствии с обстановкой) в ходе решения задачи планирования благодаря учету эмерджентных свойств кластера МКА, с целью оптимизации выполнения операций ИВ. Отличительной особенностью решаемой задачи является ее большая размерность. В частности, матрица ограничений при  $n_x \cong 10$ ,  $C_x \cong 5$ ,  $p \cong 3$  достигает размерности  $10^4$ . При такой размерности классические методы математического программирования оказываются малоэффективными [4]. В связи с этим использовался метод, основанный на идее декомпозиции, которая заключается в расчленении исходной задачи большой размерности, нахождение независимых решений для каждой из них и последующей увязке этих частных решений в общее решение исходной задачи. Соответствующий метод предложен в работе [10].

Сравнительные результаты, полученные для трех планов работы системы ИВ кластера МКА ДЗЗ, в виде значений показателей  $H_1, H_3, H_4$  на каждом из пяти интервалов постоянства ее структуры и в целом за весь интервал планирования представлены в табл. 1.

Анализ данных представленных в табл. 1 позволяет сделать обоснованные выводы о рациональности комбинированного режима К работы перспективных МКА ДЗЗ в составе кластера по сравнению со стандартными «жестко» фиксированными режимами. При режиме К структурно-функциональная избыточность и энергетические ресурсы системы эффективно используются для получения и передачи потребителю наиболее значимого для него потока мультиспектральной информации. При

Таблица 1

Значения показателей  $H_1, H_3, H_4$  для трех режимов (Э, М, К) работы кластера МКА

Интервал/показатель	ЭКО РЕЖИМ						МАКСИМАЛЬНЫЙ РЕЖИМ						КОМБИНИРОВАННЫЙ РЕЖИМ					
	1	2	3	4	5	Σ	1	2	3	4	5	Σ	1	2	3	4	5	Σ
<b>Ирез</b>						60000						48600						65061,2241
ИК-диапазон	1000	12000	8000	7000	0	28000	3000	9800	3000	7000	0	22800	302,7211	10278,912	6333,3333	2214,2857	0	19129,2517
Видимый диапазон	1000	12000	4000	3000	12000	32000	3000	13200	600	0	9000	25800	0	0	0	0	0	0
<b>H1</b>						0						0						45931,9724
Мультиспектр. диапазон	0	0	0	0	0	0,00	0	0	0	0	0	0	2789,116	17333,333	5666,6667	4142,8571	16000	45931,9724
<b>H3</b>						272700						253400						222738,06
ИК-диапазон	12000	12000	20000	25000	25000	94000	10000	12200	25200	30200	30200	107800	12000	9387,7551	17637,755	26387,755	22387,75	87801,0204
Видимый диапазон	11000	13000	24000	21000	18000	87000	9000	9800	24200	24200	24200	91400	9908,163	10908,163	21658,163	18551,02	15551,02	76576,5295
Мультиспектр. диапазон	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>H4</b>						91700						54200						58360,5102
Энергетические потоки	22400	20400	16900	16300	15700	91700	16800	9800	9200	9200	9200	54200	20462,24	12665,102	9765,8163	8603,6735	6863,674	58360,5102

этом в ЗУ перспективных МКА в *K* режиме работы на всех пяти интервалах постоянства остаточный объем сохраненной информации меньше, чем в двух других режимах, т.е. большая часть информации об объектах зондирования была доставлена потребителю. План работы системы ИВ для режима *K*, обеспечивающего большее значение целевой функции по сравнению со стандартны-

ми режимами, наглядно представлен в виде ДВМ (рис. 1). Данные, полученные из решения  $U_{\alpha}^*$ , свидетельствуют о состоятельности предложенного режима функционирования перспективных МКА ДЗЗ в составе кластера. Однако, исследования показали, что на сегодняшний день, такой режим не может быть реализован на практике в полном объеме ввиду ограниченных возможностей приемно-пере-

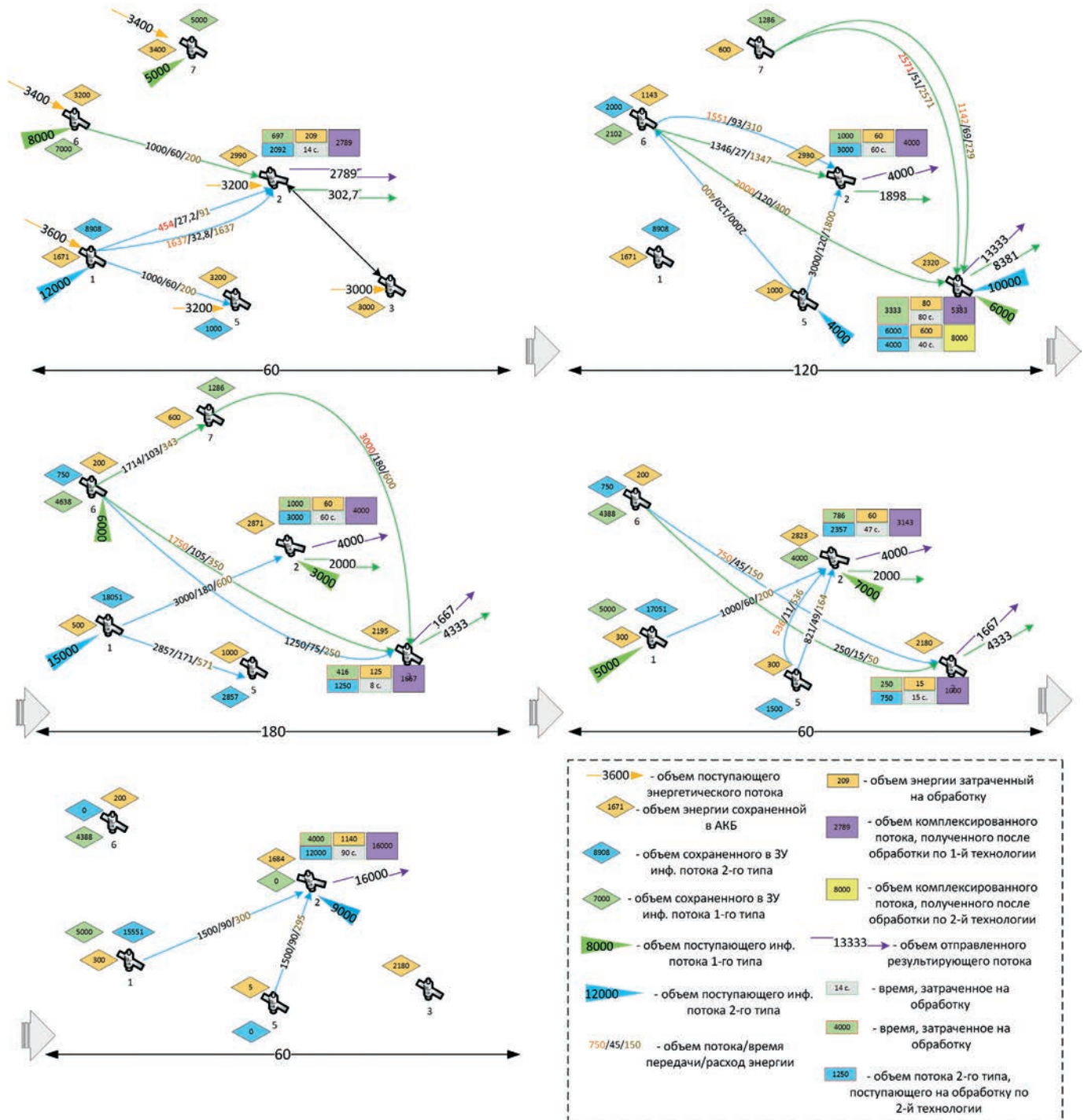


Рис. 1. План работы системы ИВ кластера перспективных МКА ДЗЗ при *K* режиме.

дающих устройств малых космических аппаратов, которые осуществляют пакетную передачу данных. Это означает, что вопросы управления информационным взаимодействием кластера МКА требуют дальнейшей проработки. В связи с этим авторами был проведен анализ возможности совершенствования режимов функционирования МКА ДЗЗ в составе кластера, который позволил заключить, что для повышения производительности таких космических систем необходимо на основе уже полученного оптимального плана работы кластера МКА ДЗЗ в  $K$  режиме осуществить структурно-параметрический синтез его системы ИВ.

### Модель структурно-параметрического синтеза системы информационного взаимодействия кластера перспективных МКА ДЗЗ

В ходе проведенных исследований, направленных на повышение производительности работы системы ИВ кластера перспективных МКА ДЗЗ, было установлено, что особую актуальность приобретает постановка и решение задач планирования и управления процессами ИВ кластера МКА ДЗЗ. В связи с этим, используя планы работы системы ИВ кластера МКА, полученные с помощью разработанной модели планирования (2–10), представленной выше, предлагается решать задачу структурно-параметрического синтеза системы ИВ кластера МКА ДЗЗ. При этом учитывается динамическое изменение структуры системы ИВ кластера МКА посредством нахождения временных интервалов ее постоянства. Выше указывалось, что при  $K$  режиме работы системы ИВ кластера МКА его структурно-функциональная избыточность и энергетические ресурсы используются более рационально, чем при стандартных режимах. Однако получаемый план работы системы ИВ, как таковой пока сложно реализуем на практике, так как применение нефиксированных (по интенсивности выполнения операций) режимов работы бортовой аппаратуры МКА требует дальнейших исследований и проработки. Наиболее правильным в настоящее время решением данного вопроса является формирование таких режимов работы системы ИВ кластера МКА, которые обеспечат равномерную и согласованную нагрузку на все МКА кластера, с учетом пакетной передачи данных по каналам связи между ними, его структурной динамики, а также возможных возмущений внешней среды. С практической точки зрения весьма актуальной является задача построения модели структурно-параметрического синтеза системы ИВ кластера МКА, с помощью которой будет возможно конструктивно учесть различные нештатные ситуации в рамках сценариев структурной динамики кластера МКА, а также при реализации планов работы его системы ИВ обеспечить необходимый уровень значения интегрального показателя качества функционирования кластера по целевому назначению. Таким образом, применительно к кластеру перспективных МКА

ДЗЗ структурно-параметрический синтез следует рассматривать как формирование технологий управления его системой ИВ, направленных на повышение результативности и робастности функционирования кластера, обладающего структурно-функциональной избыточностью и функционирующего в динамически изменяющихся условиях. Тогда задача структурно-параметрического синтеза заключается в формировании требуемых значений параметров интенсивности работы бортовой аппаратуры МКА на основе характеристик, извлекаемых из заранее получаемых планов работы системы ИВ кластера МКА в  $K$  режиме его функционирования. Такой подход должен обеспечить необходимый уровень результативности зондирования кластером МКА наземных объектов путем рационального управления работой бортовой аппаратуры МКА основанного на адаптации параметров ее функционирования.

Параметрами, характеризующими процессы передачи, обработки и хранения информационных потоков, циркулирующих в системе информационного взаимодействия кластера МКА ДЗЗ, могут быть:

- $Y_i(t)$  — объем запоминающего устройства, установленного на  $A_i(t)$ ;
- $\Psi_{ipo}(t)$  — интенсивность обработки информации  $\rho$ -го типа на  $A_i(t)$ ;
- $\omega_{j\rho d}(t)$  — интенсивность передачи информации  $\rho$ -го типа от  $A_i(t)$  к  $A_j(t)$ .

Рассматриваемая задача относится к классу задач сатисфакционного выбора, что потребовало формирования множества (11) наборов параметров работы бортовой аппаратуры МКА ДЗЗ

$$\Delta_2^{sat} = \left\{ \left\{ \omega_{ipok}^g \mid \forall i \in I, \rho \in P, o \in O, k \in K \right\}, \right. \\ \left. \left\{ \omega_{j\rho dk}^x \mid \forall j \in I / i, \rho \in P, d \in D, k \in K \right\} \right\} \quad (11)$$

При этом границы сатисфакционного множества наборов параметров работы бортовой аппаратуры МКА ДЗЗ заданы соответствующими ограничениями (12,13)

$$\omega_{ipo \min}^g \leq \omega_{ipok}^g \leq \omega_{ipo \max}^g, \forall i \in I, \rho \in P, o \in O, k \in K \quad (12)$$

$$\omega_{jdo \min}^x \leq \omega_{j\rho dk}^x \leq \omega_{jdo \max}^x, \\ \forall i \in I, \rho \in P, d \in D, k \in K, j \in I / i \quad (13)$$

где  $\omega_{ipok}^g$  — интенсивность обработки  $i$ -м МКА  $\rho$ -го потока информации ДЗЗ по  $o$ -й технологии на  $k$ -м интервале;  $\omega_{j\rho dk}^x$  — интенсивность передачи  $i$ -м МКА  $\rho$ -го потока информации ДЗЗ по  $d$ -й технологии на  $k$ -м интервале.

Тогда решение рассматриваемой задачи структурно-параметрического синтеза заключается в выборе плана работы

ИВ кластера МКА ДЗЗ с адаптированным набором значений параметров работы бортовой аппаратуры МКА ДЗЗ (14).

$$U(\omega^*) \in \Delta_{\beta}^{sat}(\omega) \subset \Delta_{\beta}(\omega) \quad (14)$$

Такое решение должно обеспечить требуемое значение показателя результативности работы системы ИВ кластера МКА ДЗЗ заданное в соответствии с выражением (15).

$$H_{\text{рез}}(U(\omega^*)) \geq \max\{H(U(\omega_{\min})), H(U(\omega_{\max}))\} \quad (15)$$

Смысл его заключается в том, что значение показателя результативности функционирования кластера МКА ДЗЗ при полученном наборе параметров должно быть не ниже значений показателей, получаемых при стандартных режимах с максимальной и минимальной интенсивностями работы бортовой аппаратуры МКА, а по возможности и превосходить их. В ходе исследований эмпирическим путем были получены формулы (16–17), позволяющие находить средневзвешенные значения синтезируемых параметров работы системы ИВ кластера МКА.

$$\omega_{ij\rho dk}^x = \frac{\omega_{ij\rho dk_{\min}}^x \cdot t_{ij\rho dk_{\min}}^x + \omega_{ij\rho dk_{\max}}^x \cdot t_{ij\rho dk_{\max}}^x}{t_{ij\rho dk_{\min}}^x + t_{ij\rho dk_{\max}}^x}, \quad (16)$$

$$\forall i \in I, d \in D, \rho \in P, k \in K$$

$$\omega_{i\rho ok}^g = \frac{\omega_{i\rho ok_{\min}}^g \cdot t_{i\rho ok_{\min}}^g + \omega_{i\rho ok_{\max}}^g \cdot t_{i\rho ok_{\max}}^g}{t_{i\rho ok_{\min}}^g + t_{i\rho ok_{\max}}^g}, \quad (17)$$

$$\forall i \in I, o \in O, \rho \in P, k \in K$$

В соответствии с разработанным алгоритмом исходные данные для расчетов искомых параметров работы бортовой аппаратуры МКА по указанным выше формулам берутся из полученного на предыдущем этапе на основе

разработанной модели многокритериального планирования (2–10) решения (плана работы системы ИВ кластера МКА ДЗЗ) имеющего следующий вид:

$$U_{\mu} = \|x_{\mu}, g_{\mu}, y_{\mu}, z_{\mu}, r_{\mu}, t_{\mu}^g, t_{\mu}^x\| = \\ = \| \|x_{\mu ij\rho dk}\|, \|g_{\mu i\rho ok}\|, \|y_{\mu i\rho k}\|, \|z_{\mu i\rho k}\|, \|r_{\mu i\rho k}\|, \|t_{\mu i\rho ok}^g\|, \|t_{\mu ij\rho dk}^x\| \|$$

Применение формул (16,17) позволяет получать усредненные значения интенсивностей работы бортовой аппаратуры МКА, на которых основывается решение задачи структурно-параметрического синтеза системы ИВ кластера МКА.

Проведенные вычислительные эксперименты показали, что значение интегрального показателя результативности функционирования кластера МКА ДЗЗ, полученное при планировании работы его системы ИВ с синтезированными параметрами, оказалось выше значений соответствующих показателей, полученных при подстановке стандартных параметров работы бортовой аппаратуры МКА. Результаты планирования с синтезированными усредненными параметрами работы бортовой аппаратуры МКА ДЗЗ представлены ниже (табл. 2).

Анализ представленной таблицы показывает, что при К режиме работы МКА ДЗЗ суммарный объем информационных потоков является наибольшим среди полученных при двух других режимах, однако по условиям выполнения операций ДЗЗ и в соответствии с требованиями заказчика наиболее важным из циркулирующих в системе ИВ кластера МКА потоков информации является четвертый его тип — мультиспектрального диапазона. Это означает, что наибольшее значение интегрального показателя результативности функционирования кластера МКА ДЗЗ с учетом коэффициентов важности информационных потоков достигается при С режиме с синтезированными параметрами.

Для наибольшей наглядности, полученные результаты планирования также представлены в виде сравнения соответствующих диаграмм, характеризующих разнородные

Таблица 2

Значения показателей  $H_p, H_s, H_d$  для трех режимов (С, М, К) работы кластера МКА

Интервал/показатель	СРЕДНИЙ РЕЖИМ						МАКСИМАЛЬНЫЙ РЕЖИМ						КОМБИНИРОВАННЫЙ РЕЖИМ					
	1	2	3	4	5	Σ	1	2	3	4	5	Σ	1	2	3	4	5	Σ
<b>Нрез</b>						60499,3885						48600						65061,22409
ИК-диапазон	0	1564,6	3666,666	0	2466,1825	7697,4485	3000	9800	3000	7000	0	22800	302,72109	10278,912	6333,3333	2214,2857	0	19129,25169
Видимый диапазон	0	0	0	0	0	0	3000	13200	600	0	9000	25800	0	0	0	0	0	0
<b>Н1</b>						52801,94						0						45931,9724
Мультиспектр. диапазон	0	18666,6663	14666,667	3468,6031	16000	52801,94	0	0	0	0	0	0	2789,1156	17333,333	5666,6667	4142,8571	16000	45931,9724
<b>Н3</b>						259250,1363						253400						222738,0601
ИК-диапазон	12000	15768,7075	16721,089	26853,938	20387,755	91731,48893	10000	12200	25200	30200	30200	107800	12000	9387,7551	17637,755	26387,755	22387,755	87801,0204
Видимый диапазон	13000	15768,7075	16721,089	26853,938	20387,755	92731,48893	9000	9800	24200	24200	24200	91400	9908,1633	10908,163	21658,163	18551,02	15551,02	76576,5295
Мультиспектр. диапазон	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Н4</b>						74787,1584						54200						58360,5102
Энергетические потоки	22600	16475,1648	13252,017	12099,988	10359,988	74787,1584	16800	9800	9200	9200	9200	54200	20462,245	12665,102	9765,8163	8603,6735	6863,6735	58360,5102

поток при режимах  $K$  и  $C$  работы системы ИВ кластера МКА ДЗЗ на пяти интервалах постоянства ее структуры (рис. 2).

Данные диаграммы позволяют увидеть, что энергетические ресурсы МКА кластера при  $C$  режиме расходуются равномерно, а их итоговый остаток на пятом интервале постоянства системы ИВ по сравнению с режимом  $K$  является наибольшим (прирост значения показателя  $H_1$  при  $C$  режиме по отношению к значению того же показателя при режиме  $K$  составил 12%). Это свидетельствует о состоятельности предложенной модели структурно-параметрического синтеза системы ИВ кластера МКА ДЗЗ. Удалось с использованием разработанных моделей планирования и синтеза добиться наиболее эффективного использования структурно-функциональной избыточности кластера МКА ДЗЗ при выполнении задач по целевому назначению в полученном  $C$  режиме работы.

### Оценка робастности системы ИВ кластера перспективных МКА ДЗЗ

Для конкретизации и конструктивного учёта влияния целенаправленных возмущений на процесс реализации соответствующего плана работы системы ИВ кластера МКА воспользуемся термином «робастность» из области систем автоматического регулирования. *Робастность системы* — это способность системы сохранять свои основные свойства (значения показателей ее целевого функционирования на допустимом уровне) в условиях достаточно больших возмущающих воздействий (изменений параметров и структур системы). Кластер МКА относится

к классу сложных комплексных систем с динамически изменяющейся структурой, для которых особую важность имеет уровень их робастности, способности адаптироваться к изменениям функционирования [16]. В связи с этим для обоснованного принятия решений по планированию ИВ кластера был проведен анализ робастности системы ИВ кластера МКА ДЗЗ, на основе разработанной модели (2)–(10). Тогда при решении рассматриваемой задачи планирования работы системы ИВ кластера МКА ДЗЗ множество сценариев (учитывающих интервально заданные воздействия  $\xi_{\mu}^{(g)}, \xi_{\mu}^{(x)} \{C_{\mu}, \mu = 1, \dots, m\}$  будет соответствовать множеству решений

$$\Delta_{\mu\beta}^* = \{U_{\mu}^*, \mu = 1, \dots, m\} \subseteq \Delta_{\mu\beta}$$

(планов работы системы ИВ кластера МКА, выбираемых из множеств допустимых планов  $\Delta_{\mu\beta}$  соответственно). Тогда для множества решений  $\Delta_{\mu\beta}^*$  можно построить его образ в критериальном пространстве. Обозначим его  $D_{\mu}$ . Для примера в данной статье рассмотрим показатели  $H_1, H_5$ , тогда каждому плану  $U_{\mu}^* \in \Delta_{\mu\beta}^*$  соответствует его образ

$$\bar{F}(U_{\mu}^*) = \|H_1(U_{\mu}^*), H_5(U_{\mu}^*)\|^T.$$

Пусть заданы допустимые границы изменений значений показателей объёмов, переданных и обработанных потоков информации в процессе функционирования кластера перспективных МКА ДЗЗ в виде следующих соотношений:  $H_{a1} \leq H_1 \leq H_{b1}$ ,  $H_{a5} \leq H_5 \leq H_{b5}$ , определяющих в пространстве показателей некоторую область  $P_H$  (рис. 3).

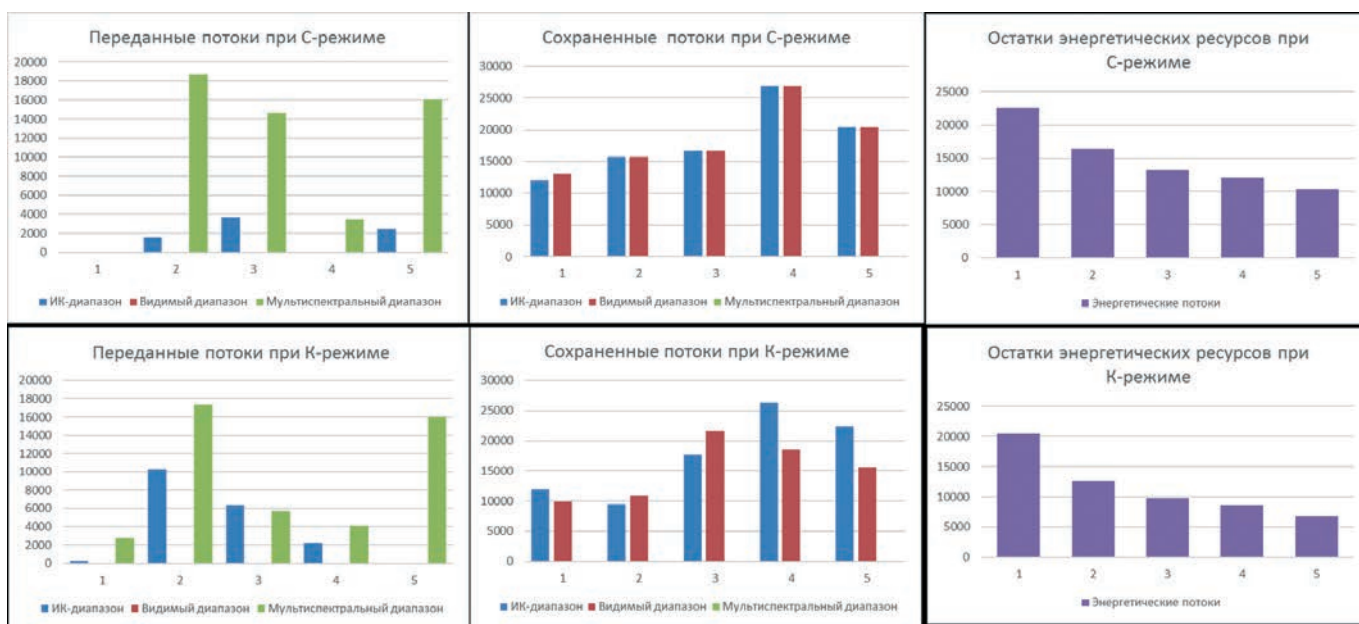


Рис. 2. Диаграммы информационных и энергетических потоков в  $K$  и  $C$  режимах.

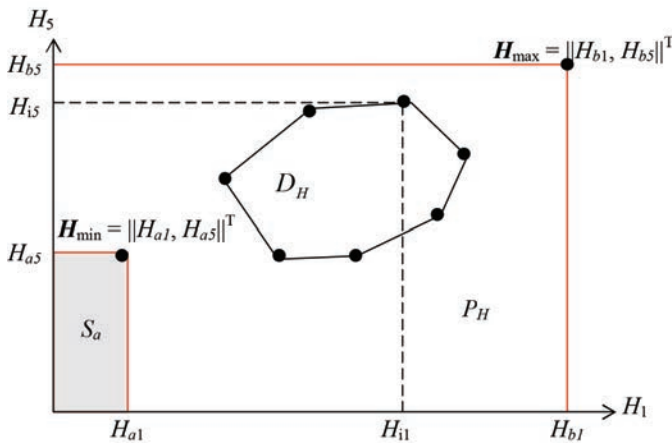


Рис. 3. Образ  $D_H$  множества  $\Delta_{\mu\beta}^*$  в критериальном пространстве

На данном рисунке  $S_a$  — область недопустимых значений показателей  $H_1, H_5$ ,  $D_H$  — область возможных значений показателей качества планирования  $H_1, H_5$ . В работе [12] показано, что если для некоторой информационной системы построены планы ее функционирования по целевому назначению  $U_{\infty}^*$ , учитывающие влияние возмущений  $\xi_{\mu}^{(g)}$ ,  $\xi_{\mu}^{(x)}$ , выполняются условия  $D_H \subset P_H$ , то система нечувствительна к воздействию данных возмущений. Тогда очевидно, чем меньше площадь пересечения, тем более робастной является система ИВ кластера МКА ДЗЗ в условиях воздействий. На рис. 4 показаны полученные  $S_a$  в результате расчетов взаимные расположения областей и  $\bar{D}_H$  (аппроксимация области  $D_H$ ) для различных режимов работы системы ИВ кластера МКА при интервально заданных значениях возмущений  $1 \leq \xi_{\mu}^{(x)} \leq 2, 1 \leq \xi_{\mu}^{(g)} \leq 2$ .

Результаты показали, что наиболее результативной и робастной является синтезированная система ИВ кластера перспективных МКА ДЗЗ работающая в режиме С, так как область  $D_1$  не пересекается с  $S_a$  и находится на наиболее удаленном от нее расстоянии по сравнению с двумя другими. Разработанный алгоритм оценки робастности по-

зволяет повышать обоснованность принятия решений по оптимальному распределению ресурсов в кластере МКА в условиях неопределенности. Предложены наглядные способы представления результатов исследований робастности системы ИВ кластера перспективных МКА ДЗЗ.

**Заключение**

В рамках статьи был предложен подход к формированию К режима функционирования системы ИВ кластера МКА ДЗЗ. Такой комбинированный режим основан на выборе оптимальных в соответствии с прогнозируемой обстановкой технологий выполнения целевых и обеспечивающих функций кластером с учетом баланса энергопотребления и интенсивности выполнения операций ИВ. Данный режим позволяет наиболее полно реализовать потенциальные возможности кластера перспективных МКА ДЗЗ и использовать его структурно-функциональную избыточность. Разработана обобщенная модель структурно-параметрического синтеза системы ИВ кластера МКА ДЗЗ. В соответствии с разработанным алгоритмом, на основе исходных данных, полученных из решения (плана), формируемого многокритериальной моделью планирования работы системы ИВ кластера при К режиме, осуществляется сатисфакционный выбор необходимого набора параметров работы бортовой аппаратуры МКА ДЗЗ. Это в свою очередь позволяет добиться повышения результативности целевого функционирования кластера на 12% по сравнению с работой системы ИВ кластера МКА ДЗЗ со стандартными параметрами. Можно предположить, что использованная при расчетах модель в условиях прогнозируемой динамики системы ИВ позволяет рационально использовать энергетические ресурсы МКА, согласно вводимым в модель согласующим коэффициентам важности информационного и энергетического показателей эффективности функционирования кластера ДЗЗ. Также разработан алгоритм оценки робастности системы ИВ кластера перспективных МКА ДЗЗ, который позволяет повысить обоснованность принятия решений по планированию ее работы в условиях воздействий.

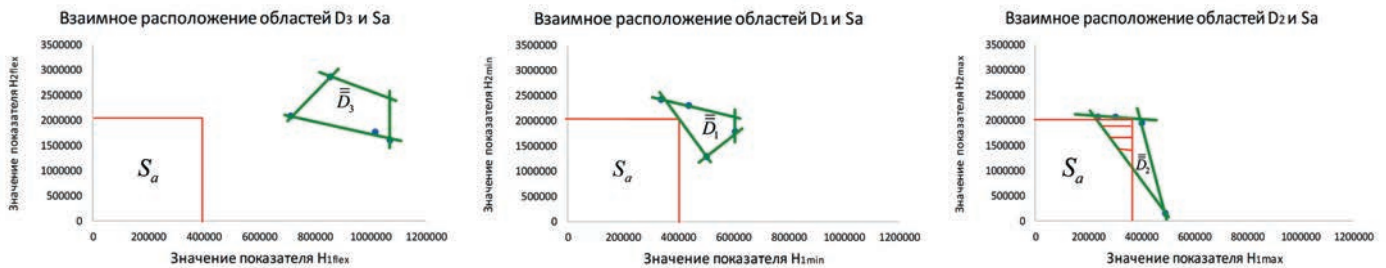


Рис. 4. Взаимное расположение областей  $S_a$  и  $\bar{D}_H$ .

## Литература

1. Павлов Д. А., Осипенко С. А., Масалкин А. А., Слинко А. А. Подход к решению задачи поиска интервалов постоянства структуры кластеров малых космических аппаратов // Сборник трудов II Всероссийской НТК «Теоретические и прикладные проблемы развития и совершенствования автоматизированных систем управления военного назначения». СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2015. С. 194–195.
2. Маκριденко Л. А., Минаев И. В., Потюпкин А. Ю. Структурные особенности создания группировки малых КА дистанционного зондирования Земли // Материалы второй международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». М.: ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2014. С. 4–6.
3. Мануйлов, Ю. С., Калинин В. Н., Гончаревский В. С., Делий И. И., Новиков Е. А. Управление космическими аппаратами и средствами наземного комплекса управления / под общ. ред. Ю. С. Мануйлова. СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2010. 609 с.
4. Малые космические аппараты информационного обеспечения / под ред. В. Ф. Фатеева. М.: Радиотехника, 2010. 320 с.
5. Данциг Дж. Линейное программирование, его применения и обобщения. М.: Прогресс, 1965. 600 с.
6. Заде Л. А. Теория линейных систем. Метод пространства состояний. М.: Наука, 1970. 704 с.
7. Мальцев Г. Н., Кунгурцев И. А., Козин В. В. Дистанционное зондирование Земли на основе кластера малых космических аппаратов многоспектрального наблюдения // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. СПб. 2009. Т. 52. № 4. С. 16–22.
8. Соллогуб А. В., Скобелев П. О., Симонова Е. В., Царев А. В., Степанов М. Е., Жилыев А. А. Интеллектуальная система распределенного управления групповыми операциями кластера малоразмерных космических аппаратов в задачах дистанционного зондирования земли // Информационно-управляющие системы. СПб. 2013. № 1. С. 16–26.
9. Павлов Д. А. Методика планирования операций информационного взаимодействия кластера малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. 2014. № 649. С. 37–47.
10. Слинко А. А., Павлов А. Н., Павлов Д. А., Павлов А. А. Модель планирования операций устойчивого информационного взаимодействия кластера малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Труды Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского. 2016. № 654. С. 8–13.
11. Горбунов А. В., Слободской И. Н. Космический комплекс оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций «Канопус-В» // Геоматика. 2010. № 1. С. 30–33.
12. Потрясаев С. А. Постановка и пути решения задачи комплексного планирования реконфигурации катастрофоустойчивых систем // Труды СПИИРАН. 2006. Т. 2. № 3. С. 374–382.
13. De Florio S. Performances Optimization of Remote Sensing Satellite Constellations: a Heuristic Method // Proc. of 5th Intern. Workshop on Planning and Scheduling for Space (IWSS2006), October 22–25, 2006.— Space Telescope Science Institute Baltimore, USA. URL: [www.stsci.edu/largefiles/iwss/20069151043Paper.pdf](http://www.stsci.edu/largefiles/iwss/20069151043Paper.pdf) (дата обращения: 05.08.2017).
14. Pavlov A. N., Pavlov A. A., Slinko A. A., Pashenko A. E. Research of structural reliability and survivability of complex objects // Springer. Automation Control Theory Perspectives in Intelligent Systems» Proceedings of the 5th Computer Science In-Line Conference. 2016. Vol 3. Pp. 463–473.
15. Mattila V., Virtanen K. Ranking and selection for multiple performance measures using incomplete preference information // European Journal of Operational Research. 2015. Vol. 242. No. 2. Pp. 568–579.
16. Potryasaev S., Okhtilev P., Ipatov Y., Sokolov B. Methodology and structure adaptation algorithm for complex technical objects reconfiguration models // Springer. Cybernetics and Mathematics Applications in Intelligent Systems Proceedings of the 6th Computer Science On-line Conference. 2017. Vol. 574. Pp. 319–328.



## STRUCTURAL-PARAMETRIC SYNTHESIS OF THE SYSTEM OF INFORMATION INTERACTION OF A CLUSTER OF PERSPECTIVE SMALL SATELLITES OF REMOTE SENSING OF THE EARTH AND THE EVALUATION OF ITS ROBUSTNESS

**ALEXANDER N. PAVLOV,**

St-Peterburg, Russia, pavlov62@list.ru

**DMITRY A. PAVLOV,**

St-Peterburg, Russia, dpavlov239@mail.ru

**ALEXEY A. SLIN'KO,**

St-Peterburg, Russia, thebestman\_leshka@mail.ru

### ABSTRACT

The article is devoted to research in the area of the rocket and space industry, which is actively developing in the present days, such as the creation and application of promising small satellites of remote sensing of the Earth and modern orbital groups based on them. In this case, the functioning of small satellites is carried out as part of so-called clusters. The actual question is the rational and effective information interaction of small spacecraft within the cluster in the performance of target tasks. In this regard, the article considers the questions of planning of system of information interaction of the cluster of perspective small satellites of remote sensing. An original model for planning the work of the information interaction system for a cluster of perspective small satellites of remote sensing of the Earth has been developed, which makes it possible to find plans that increase the cluster's productivity, taking into account its structural dynamics and predicted external disturbances. Based on the analysis of the obtained plans, a model (technique) of the structural-parametric synthesis of the information interaction system of a cluster of small satellites was developed. The proposed approach to the formation of modes of functioning perspective of small satellites, based on the choice of rational technology operations information interaction with the balance of energy expenditure in small satellites. The robustness of the information interaction system of the cluster of perspective small satellites of remote sensing of the Earth is estimated. The estimation consists in the construction and approximation of sets of domains in the space defined by the decision maker of the operation indicators of the cluster's information interaction system for the case of interval defined disturbing influences. This reduces the time for decision-making on the rational allocation of resources in the cluster in terms of disturbing effects. Visual methods for presenting the results of studies of the robustness of the information interaction system, using which it is possible to choose

**KEYWORDS:** remote sensing of the Earth; cluster of small satellites; information interaction; structural-parametric synthesis; robustness of the information interaction system.

the most preferred plans for the operation of a cluster of small satellites of remote sensing of the Earth, are proposed.

### REFERENCES

1. Pavlov D.A., Osipenko S.A., Masalkin A.A., Slin'ko A.A. *Podhod k resheniju zadachi poiska intervalov postojanstva struktury klasterov malyh kosmicheskikh apparatov* [The approach to solving the problem of finding intervals of constancy of the structure of clusters of small spacecraft] *Sbornik trudov II Vserossijskoj NTK «Teoreticheskie i prikladnye problemy razvitija i sovershenstvovanija avtomatizirovannyh sistem upravlenija voennogo naznachenija»*. SPb.: VKA imeni A.F.Mozhajsogo, 2015. Pp. 194-195. (In Russian)
2. Makridenko L. A., Minaev I. V., Potjupkin A. Ju. *Strukturnye osobennosti sozdanija gruppirovki malyh KA distancionnogo zondirovanija Zemli* [Structural features of creating a constellation of small satellites for remote sensing of the Earth] *Materialy vtoroj mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Aktual'nye problemy sozdanija kosmicheskikh sistem distancionnogo zondirovanija Zemli»*. M.: Korporacija «VNII-JeM», 2014. Pp. 4-6. (In Russian)
3. Manujlov Ju.S., Kalinin V.N., Goncharevskij V.S., Delij I.I., Novikov E.A., Manujlova Ju.S.(Ed.). *Upravlenie kosmicheskimi apparatami i MEDIUMstvami nazemnogo kompleksa upravlenija: uchebnik* [Operation of spacecraft and ground control system] Ju.S. Manujlov V.N. Kalinin V.S. Goncharevskij I.I., Delij, E.A. Novikov; pod obshh. red. Ju.S. Manujlova. SPb.: VKA imeni A.F. Mozhajsogo, 2010. 609 p.
4. Fateev V.F. *Malye kosmicheskije apparaty informacionnogo obespechenija* [Small spacecraft information support]. M.: Radiotekhnika, 2010. 320 p.
5. Dancig Dzh. *Linejnoe programmirovanie, ego primeneniya i obobshhenija* [Linear programming, its applications and generalizations]. M.: Progress, 1965. 600 p.

6. Zade L.A. *Teorija linejnyh sistem. Metod prostranstva soztojanij* [The theory of linear systems. The method of the state space]. M.: Nauka, 1970. 704 p.
7. Mal'cev G. N., Kungurcev I. A., Kozinov V. V. *Distancionnoe zondirovanie Zemli na os-nove klastera malyh kosmicheskikh apparatov mnogospektral'nogo nabljudenija* [Remote sensing of the Earth based on cluster of small spacecraft multi-spectral observations]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie*. SPb. 2009. Vol. 4, no. 52. Pp. 16-22.
8. Sollogub A. V., Skobelev P. O., Simonova E. V., Carev A. V., Stepanov M. E., Zhiljaev A. A. *Intellektual'naja sistema raspredelennogo upravlenija gruppovymi operacijami klastera malorazmernyh kosmicheskikh apparatov v zadachah distancionnogo zondirovanija zemli* [Intelligent system distributed control of group operations of a cluster of small spacecraft in problems of remote sensing of the earth]. *Informacionno-upravljajushhie sistemy*. SPb. 2013. Vol. 1. Pp. 16-26.
9. Pavlov D. A. *Metodika planirovanija operacij informacionnogo vzaimodejstvija klastera malyh kosmicheskikh apparatov distancionnogo zondirovanija Zemli* [The technique of operations scheduling communications between a cluster of small spacecraft remote sensing of the Earth]. *Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii imeni A. F. Mozhajskogo*. 2014. No. 649. Pp. 37-47.
10. Slin'ko A. A., Pavlov A. N., Pavlov D. A., Pavlov A. A. *Model' planirovanija operacij ustojchivogo informacionnogo vzaimodejstvija klastera malyh kosmicheskikh apparatov distancionnogo zondirovanija Zemli* [The planning model of sustainable operations information interaction cluster of small spacecraft remote sensing of the Earth]. *Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii im. A. F. Mozhajskogo*. 2016. No. 654. Pp. 8-13.
11. Gorbunov A. V., Slobodskoj I. N. *Kosmicheskij kompleks operativnogo monitoringa tehnoennyh i prirodnyh chrezvychajnyh situacij «Kanopus-V»* [Space complex of operative monitoring of technogenic and natural disasters "Canopus-b"]. *Geomatika*. 2010. Vol. 1. Pp. 30-33.
12. Potrjasaev S. A. *Postanovka i puti reshenija zadachi kompleksnogo planirovanija rekonfiguracii katastrofoustojchivykh sistem* [Formulation and solutions of problems of comprehensive planning reconfiguration fault-tolerant systems]. *SPIIRAS PROCEEDINGS*. 2006. Vol. 3. No. 2. Pp. 374-382.
13. De Florio S. Performances Optimization of Remote Sensing Satellite Constellations: a Heuristic Method. *Proc. of 5th Intern. Workshop on Planning and Scheduling for Space (IWPSS 2006)*, October 22-25, 2006. – Space Telescope Science Institute Baltimore, USA. URL: [www.stsci.edu/largefiles/iwpss/200691510\\_43Paper.pdf](http://www.stsci.edu/largefiles/iwpss/200691510_43Paper.pdf) (address date: 05.08.2017).
14. Pavlov A. N., Pavlov A. A., Slinko A. A., Pashenko A. E. Research of structural reliability and survivability of complex objects. *Springer. Automation Control Theory Perspectives in Intelligent Systems» Proceedings of the 5th Computer Science In-Line Conference*. 2016. Vol 3. Pp. 463-473.
15. Mattila V., Virtanen K. Ranking and selection for multiple performance measures using incomplete preference information. *European Journal of Operational Research*. 2015. Vol. 242. No. 2. Pp. 568-579.
15. Potrjasaev S., Okhtilev P., Ipatov Y., Sokolov B. Methodology and structure adaptation algorithm for complex technical objects reconfiguration models. *Springer. Cybernetics and Mathematics Applications in Intelligent Systems Proceedings of the 6th Computer Science On-line Conference*. 2017. Vol. 574. Pp. 319-328.

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Pavlov A. N., PhD, Docent, Professor of the Military Space Academy;

Pavlov D. A., PhD, Chief of the Laboratory of the Military Space Academy;

Slinko A. A., Postgraduate Student of the Military Space Academy.

---

**FOR CITATION:** Pavlov A. N., Pavlov, D. A., Slin'ko A. A. Structural-parametric synthesis of the system of information interaction of a cluster of perspective small satellites of remote sensing of the Earth and evaluation of its robustness. *H&ES Research*. 2017. Vol. 9. No. 5. Pp. 6-18. (In Russian)

# ИНФОРМАЦИОННЫЙ МЕТОД КАЛИБРОВКИ И ВАЛИДАЦИИ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

**СУЛЕЙМАНОВ**  
**Тофик Инаят оглы<sup>1</sup>**

**МАМЕДОВ**  
**Илкин Эльбрус оглы<sup>2</sup>**

---

<sup>1</sup>д.т.н., профессор, заместитель генерального директора по науке Национального аэрокосмического агентства, г. Баку, Азербайджан, [suleymanovti55@mail.ru](mailto:suleymanovti55@mail.ru)

<sup>2</sup>аспирант Национального аэрокосмического агентства, г. Баку, Азербайджан, [mamedovilkin@rambler.ru](mailto:mamedovilkin@rambler.ru)

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

беспилотный летательный аппарат; дистанционное зондирование; калибровка; валидация; спектрорадиометр; гиперспектрометр.

## АННОТАЦИЯ

Рассмотрена возможность осуществления калибровки и валидации спутниковых данных дистанционного зондирования с помощью спектрорадиометрической аппаратуры установленной на беспилотных летательных аппаратах. Реализация общей идеи использования сенсоров беспилотных летательных аппаратов для калибровки и валидации сенсоров, установленных на спутниках требует решения ряда технических и методологических задач. Отмечена нарастающая тенденция осуществления калибровки и валидации сенсоров спутников дистанционного зондирования с помощью сенсоров, устанавливаемых на беспилотных летательных аппаратах. При этом должны быть приняты во внимание следующие различия между сенсорами спутников и беспилотных летательных аппаратов – пространственное разрешение на земле у сенсора беспилотного летательного аппарата намного лучше, чем у спутникового сенсора, кроме того, пространственный охват спутника намного шире, чем у беспилотного летательного аппарата. Вышеуказанные причины приводят к сильной коррелированности данных спутникового сенсора при исследовании гомогенных наземных растительных полей, по сравнению с данными беспилотного летательного аппарата. Это объясняется фильтрацией высокочастотных составляющих сигнала, формируемого оптической системой сенсора спутника на инерционных фотоприемниках дискретной структуры. Указанная неидентичность статистических показателей сенсоров беспилотного летательного аппарата и спутника приводит к необходимости решения следующей методологической задачи: какова должна быть временная длительность проведения измерений с помощью беспилотного летательного аппарата, чтобы обеспечить достоверную валидацию и калибровку сенсоров спутника с помощью средств, установленных на беспилотных летательных аппаратах. Предложена методика выбора режимных показателей сенсоров беспилотного летательного аппарата, используемого для валидации и калибровки сенсоров в спутников. Предложенная методика основана на информационном критерии Темникова и позволяет определить режимные показатели полета беспилотных летательных аппаратов используемых для проведения калибровки. Разработана методика вычисления основных показателей полета беспилотных летательных аппаратов.

---

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сулейманов Т. И., Мамедов И.Э. Информационный метод калибровки и валидации спутниковых данных с помощью беспилотных летательных аппаратов // Научно-технические исследования в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 5. С. 19-24.

Как сообщается в работе [1], данные получаемые с термальных камер и спектрорадиометров, установленных на беспилотных летательных аппаратах (БПЛА) позволяют осуществить калибровку и валидации спутниковых данных полученных от ASTER и LANDSAT 8. Использование БПЛА в указанных целях особенно важно при организации спутникового контроля за состоянием вулканов, где должны быть дистанционно измерены такие показатели как температура, давление, концентрации  $SO_2$ ,  $H_2S$ ,  $CO_2$  с GPS привязкой к местности. Вопросы использования БПЛА для калибровки и валидации спутниковых данных также рассмотрены в работах [2–8]. Как отмечается в этой работе, для осуществления викариозной калибровки сенсоров установленных на спутниках дистанционного зондирования используются два гиперспектратора видимого и ближнего ИК диапазона. Это обуславливает высокие точностные требования, которые выставляются к метрологическим характеристикам аппаратуры, устанавливаемой на БПЛА.

В работе [9] сообщается о возможности использования БПЛА для калибровки и валидации данных спутника GOES — 16 находящейся на геостационарной орбите высотой 22.300 миль. Следует отметить, что использование БПЛА для калибровки и валидации спутниковых сенсоров дистанционного зондирования становится все более развивающимся направлением в общей теории и практики обеспечения достоверности и результатов дистанционного зондирования земли с космоса. С технической стороны такая тенденция поддерживается появлением малогабаритных сенсоров, обладающих достаточно высокими метрологическими характеристиками [10,11]. Так например, в работе [12], сообщается о разработке малогабаритного гиперспектратора спектрального диапазона 338–824 нм с разрешением 3 нм.

Согласно [13], еще в 2003-м году был разработан малогабаритный гиперспектратор со спектральным диапазоном 480–880нм, со спектральным разрешением 1нм для установки на БПЛА, осуществляющую контроль за созданием сельскохозяйственной продукции.

Вместе с тем, реализация общей идеи использования сенсоров БПЛА для калибровки и валидации сенсоров, установленных на спутниках требует решения ряда технических и методологических задач. Технические задачи, заключающиеся в повышении метрологических характеристик сенсоров БПЛА решаются достаточно успешно, что можно увидеть на таблице сравнительных данных гиперспектраторов, устанавливаемых в настоящее время на БПЛА, самолетах и на спутниках [11].

Как видно из данных, приведенных на таблице, характеристики сравниваемых устройств сильно различаются в таких показателях как разрешение на Земле и размер изображения на Земле, что в свою очередь приводят к появлению некоторых методологических проблем при решении задачи использования БПЛА для калибровки и валидации спутниковых данных.

Основным из таких методологических проблем является появляющиеся различия в статистических показателях исследуемых идентичных сцен. Так, ширина гистограмм измеренных величин NDVI для БПЛА составила  $0,2 \pm 0,9$ ; для самолета  $0,3 \pm 0,7$ ; для спутника  $0,5 \pm 0,65$  (рис.1) [11].

Как видно из гистограмм, приведенных на рис.1, гистограмма данных спутника намного уже чем гистограмма данных БПЛА, что обусловлена следующими причинами:

1. Пространственные разрешение на земле у сенсора БПЛА намного лучше, чем у спутникового сенсора.
2. Пространственный охват спутника намного шире, чем у БПЛА.

Таблица

	<b>БПЛА</b>	<b>САМОЛЕТ</b>	<b>СПУТНИК</b>
Платформа	Mikrokarter Okto XL	Sky Arrow 650 TC/P68	Rapid Eye
Камера	Tetracam ADC lite	AS PIS	REIS
Количество каналов	3	12	5
Охватываемый диапазон длин волн	526 – 900 nm	415 – 910 nm	440 – 850 nm
Размеры	114 x 77 x 22 мм	270 x 250 x 20 мм	656 x 361 x 824 мм
Вес	0,2 кг	10 кг	62 кг
Разрешение	2048 x 1536	2048 x 2048	12000 пикселей линейка на каждом диапазоне
Разрешение на земле	0,05 м/пиксель	0,05 м/пиксель	5 м/пиксель
Размер изображения на земле	116,5 x 87,5 м	1024 x 1024 м	77 x 45 км

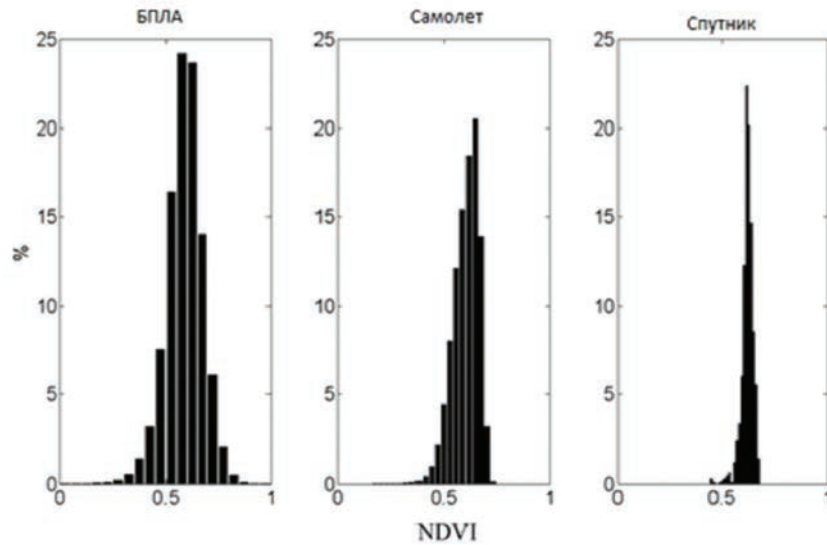


Рис. 1. Гистограммы измеренных величин NDVI с помощью сенсоров БПЛА, самолета и спутника

Вышеуказанные причины приводят к сильной коррелированности данных спутникового сенсора при исследовании гомогенных наземных растительных полей, по сравнению с данными БПЛА. Это объясняется фильтрацией высокочастотных составляющих сигнала, формируемого оптической системой сенсора спутника на инерционных фотоприемниках дискретной структуры.

Указанная неидентичность статистических показателей сенсоров БПЛА и спутника приводит к необходимости решения следующей методологической задачи: Какова должна быть временная длительность проведения измерений с помощью БПЛА, чтобы обеспечить достоверную валидацию и калибровку сенсоров спутника с помощью средств, установленных на БПЛА. Базовым положением предлагаемого критерия является следующее равенство

$$M_{SS} = M_{UAV} \quad (1)$$

где:  $M_{SS}$  – количество информации, вырабатываемой сенсором спутника за период пролета спутника над исследуемых полей;  $M_{UAV}$  – тоже для БПЛА.

Изложим математическое решение с формулированной задачи. Используя известное определение количества информации Шеннона можем записать следующие выражения

$$M_S = \frac{T_s}{\Delta t_s} \cdot \log_2 \left[ \frac{v_{s,m} + 1}{\Delta v_s} \right] \quad (2)$$

$$M_D = \frac{T_d}{\Delta t_d} \cdot \log_2 \left[ \frac{v_{d,m} + 1}{\Delta v_d} \right] \quad (3)$$

где:  $T_s, T_d$  — длительности съема информации с исследуемого поля с помощью спутника и БПЛА соответственно;

$\Delta t_s, \Delta t_d$  — временные дискреты съема информации спутника и БПЛА соответственно;

$U_{s,m}, U_{d,m}$  — максимальные значения измерительного сигнала спутника и БПЛА соответственно;

$\Delta U_s, \Delta U_d$  — кванты сигналов спутнике и БПЛА соответственно;

Как было отмечено, измерительные сигналы спутника и БПЛА коррелированы в разной степени. Если аппроксимировать эти сигналы нормальным Марковским процессом с нормированной корреляционной функцией в виде

$$R(\tau) = e^{-\alpha|\tau|}$$

где:  $\tau$  — временной шаг;  $\alpha$  — показатель степени корреляции в сигнале, то используя известный среднеквадратичный критерий Темникова Ф.Е. легко можем получить следующие уравнения [14–15]

$$\tau_s = \frac{1}{\alpha_s} \ln \left[ \frac{1}{1 - \frac{\bar{\epsilon}_s^2}{2B_s(o)}} \right] \quad (5)$$

$$\tau_d = \frac{1}{\alpha_d} \ln \left[ \frac{1}{1 - \frac{\bar{\epsilon}_d^2}{2B_d(o)}} \right] \quad (6)$$

где:  $\varepsilon_s, \varepsilon_d$  среднеквадратичные погрешности квантования.

С учетом выражений (1), (2), (3), (4), (5), (6) запишем

$$T_D = k \cdot T_s \quad (7)$$

где:

$$K = \frac{\alpha_s \cdot \ln \left[ \frac{1}{1 - \bar{\varepsilon}_d^2 / B_d(o)} \right] \log_2 \left( \frac{v_{s-m}}{\Delta v_s} \right)}{\alpha_d \cdot \ln \left[ \frac{1}{1 - \bar{\varepsilon}_s^2 / B_s(o)} \right] \log \left( \frac{v_{d-m}}{\Delta v_d} + 1 \right)} \quad (8)$$

Приняв равенства

$$\varepsilon_s = \Delta v_s$$

$$\varepsilon_d = \Delta v_d$$

$$B_d(o) = \beta v_{d-m}$$

$$B_s(o) = \beta v_{s-m}$$

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{8}}$$

$$N_d = \frac{v_{d-m}}{\Delta v_d}$$

Выражение (8) запишем в следующем виде.

$$K = \frac{C_1 \cdot \ln \left[ \frac{1}{1 - \frac{1}{N_d^2}} \right]}{\alpha_d \cdot \log_2 (N_d + 1)} \quad (9)$$

где:  $C_1$  — обобщенный показатель измерительного сигнала спутника определяемый как:

$$C_1 = \frac{\alpha_s \cdot \log_2 \left( \frac{v_{s-m}}{\Delta v_s} + 1 \right)}{\ln \left[ \frac{1}{1 - \frac{\bar{\varepsilon}_s^2}{2B_s(o)}} \right]} \quad (11)$$

Отметить, что показатель  $C_1$  характеризует информативные свойства измерительного сигнала спутника и в рас-

считываемом контексте не подлежит изменению. Вместе с тем, как видно из выражения (9) величина коэффициента  $K$  сильно зависит от  $\alpha_d$  и  $N_d$ , т.е. от показателя коррелированности измерительного сигнала БПЛА и от количества используемых квантов измерительного сигнала БПЛА.

Следовательно, для уменьшения  $T_D$  — следуем увеличить количество квантов в сигнале и/или увеличить степень коррелированности сигнала БПЛА.

Таким образом, с учетом вышеизложенного, можно предложить следующую методику выбора режимных показателей сенсоров БПЛА, используемого для валидации и калибровки сенсоров в спутников:

1. Устанавливаются показатели  $T_s$  и  $C_1$  характеризующие полетный режим спутника, а также сенсоров спутника и наземный полигон, используемый для калибровки и валидации.

2. По заданной величине  $T_D$  — временного ресурса, затрачиваемого на операции калибровки и валидации определяется величине  $K$  по формуле (9).

3 (а). Задаваясь величиной  $\alpha_d$ , используя выражение (9) вычисляется необходимая величина  $N_d$ ; или

3 (б). Задаваясь величиной  $N_d$  вычисляется необходимая величина  $\alpha_d$ .

4. Используя заданную или вычисленную по формуле (6) величину  $\tau_d$  определяется скорость  $v$  передвижения БПЛА по формуле

$$v = \Delta l / \tau_d$$

где:  $\Delta l$  — пространственный шаг корреляции исследуемого объекта на полигоне

В заключение сформулируем основные выводы и положения проведенного исследования:

1. Отмечена нарастающая тенденция осуществления калибровки и валидации сенсоров спутников дистанционного зондирования с помощью сенсоров, устанавливаемых на БПЛА, осуществляемых синхронный облет калибровочного полигона.

2. Предложен информационный критерий для определения режимных показателей полета БПЛА используемых для проведения калибровки.

3. Разработана методика вычисления режимных показателей полета БПЛА.

## Литература

1. *Silvestri M., Musacchio M., Buongiorno M. F., Doumaz F., Diar J. A.* Geophysical Research Abstracts // EGU General Assembl. 2017. Vol. 19. EGU2017–13169.

2. *Nemenyi M., Milics G.* Precision agriculture technology and diversity // Cereal Research Communications. 2007. No. 35. Pp. 829–832.

3. Franke J., Menz G. Multi-temporal wheat disease detection by multi-spectral remote sensing // Precision Agriculture. 2007. No. 8. Pp. 161–172.
4. Berni J.A.J., Zarco-Tejada P.J., Suarez L., Gonzalez-Dugo V., Fereres E. Remote sensing of vegetation from UAV platforms using lightweight multispectral and thermal imaging sensors // Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Hannover, Germany. 2009. Vol. 1–4–7/W5. Pp. 6.
5. Chao H., Baumann M., Jensen A., Chen Y.Q., Cao Y., Ren W., McKee M. Band-reconfigurable multi-UAV based cooperative remote sensing for real-time water management and distributed irrigation control // IFAC World Congress, 2008. Vol.41. Issue 2. Pp.11744–11749.
6. Hakala T., Honkavaara E., Saari H., Makynen J., Kaivosoja J., Pesonen L., Polonen I. Spectral imaging from UAVs under varying illumination conditions. International Archives of the Photogrammetry // Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2013. Vol. XL-1/W2. Pp. 189–194.
7. Grenzdorffer G., Bill R. (Eds.). UAV-g2013 // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (4–6 Sep Rostock, Germany). 2013. Vol. XL-1/W2. 423 p.
8. Potts D.R. Hyperspectral Imaging from Unmanned Aerial Vehicles for the Calibration and Validation of Earth Observation Satellites. Doctoral thesis. UCL (University College London). 2014. URL: <http://discovery.vcl.ac.uk/1451799/>
9. Scientists Begin Field Campaign for NOAA's GOES-16. URL: <https://www.nesdis.noaa.gov/content/scientists-begin-field-campaign-noaa%E2%80%99s-goes-16>.
10. Tsouvaltsidis C., Zaid Al Salem N., Benari G., Vrekalic D., Quine B. Remote spectral imaging using a low cost uav system // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. 2015. Vol. XL-1/W4. Pp. 25–31. URL: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-25-2015>, 2015.
11. Matese A., Toscano P., Gennaro S.F.D., Genesio L., Vaccari F.P., Primicerio J., Belli C., Zaldei A., Bianconi R., Gioli B. Intercomparison of UAV, Aircraft and Satellite Remote Sensing Platforms for Precision Viticulture Remote Sens // Remote Sens. 2015. Vol. 7. Issue 3. Pp. 2971–2990; doi:10.3390/rs70302971.
12. Von Bueren S.K., Burkart A., Hueni A., Rascher U., Tuoh M.P., Yule I.J. Deploying four optical UAV-based sensors over grassland: challenges and limitations // Biogeosciences. 2015. No. 12(1). Pp. 163–175.
13. Johnson L.F., Herwitz S., Dunagan S., Lobitz B., Sullivan D., Slye R. Collection of ultra high spatial and spectral resolution image data over California vineyards with a small UAV // Proceedings of the 30th International Symposium on Remote Sensing of Environment. 2003. Vol. 20. Pp. 845–849.
14. Крючковский В. В., Подмогильный Н. В. Контроль реализации принятых решений жизненного цикла решений // Наук ови праці Дон НТУ. Вып. 148. С. 96–103.
15. Темников Ф. Е. Теоретические основы информационной техники. М.: Энергия, 1971. 424с.

---

## INFORMATION METHOD FOR CALIBRATION AND VALIDATION OF SATELLITE DATA USING DRONES

**TOFIK I. SULEYMANOV,**

Baku, Azerbaijan, [suleymanovti55@mail.ru](mailto:suleymanovti55@mail.ru)

**ILKIN E. MAMEDOV,**

Baku, Azerbaijan, [mamedovilk@rambler.ru](mailto:mamedovilk@rambler.ru)

### ABSTRACT

The possibility for carrying out of calibration and validation of satellite remote sensing data using the spectroradiometric instruments installed on the drone is considered. Realization of general idea concerning utilization of drones sensors for calibration and validation of satellites sensors requires solution of some technical and methodological tasks. The increasing ten-

**KEYWORDS:** drones; remote sensing; calibration; validation; spectroradiometer; hyper spectrometer.

gency of carrying out of calibration and validation of satellite remote sensing sensors by help of drones sensors is noted. In this case following differences between sensors of satellites and drones should be taken into account – the spatial resolution of drones sensors is more better than that of satellites. Besides, the spatial scope of satellite is broader than that of

drones. Above mentioned causes lead to strong correlation of satellites sensors data upon research of homogenic on-earth vegetation fields in comparison with drones data. This can be explained by filtration of high frequency components of signals formed by optical system of satellite sensors containing inertial photo receiver of matrix structure. The said non-identity property of statistical characteristics of drones and satellites sensors lead to necessity of solution of following methodology task what should be duration of measurements carried out by drones in order to provide for the authentic validation and calibration of satellite sensors using drones instruments. The method for selection of regime parameters of drones sensors used for validation and calibration of satellites sensors is developed. The suggested methodology is based on Temnikov information criterion and allows to define the regime parameters of drones flight used for calibration. The method for calculation of major parameters of drones flight is developed.

## REFERENCES

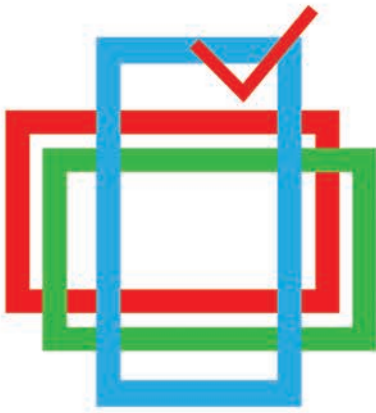
1. Silvestri M., Musacchio M., Buongiorna M.F., Doumaz F., Diar J.A. Geophysical Research Abstracts. *EGU General Assembl.* 2017. Vol. 19. EGU2017-13169.
2. Nemenyi M., Milics G. Precision agriculture technology and diversity. *Cereal Research Communications*. 2007. No. 35. Pp. 829-832.
3. Franke J., Menz G. Multi-temporal wheat disease detection by multi-spectral remote sensing. *Precision Agriculture*. 2007. No. 8. Pp. 161-172.
4. Berni J.A.J., Zarco-Tejada P.J., Suarez L., Gonzalez-Dugo V., Fereres E. Remote sensing of vegetation from UAV platforms using lightweight multispectral and thermal imaging sensors. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Hannover, Germany. 2009. Vol. 1-4-7/W5. Pp. 6.
5. Chao H., Baumann M., Jensen A., Chen Y.Q., Cao Y., Ren W., McKee M. Band-reconfigurable multi-UAV based cooperative remote sensing for real-time water management and distributed irrigation control. *IFAC World Congress*. 2008. Vol.41. Issue 2. Pp.11744-11749.
6. Hakala T., Honkavaara E., Saari H., Makynen J., Kaivosoja J., Pesonen L., Polonen I. Spectral imaging from UAVs under varying illumination conditions. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2013. Vol. XL-1/W2. Pp. 189-194.
7. Grenzdorffer G., Bill R. (Eds.). UAV-g2013. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (4-6 Sep Rostock, Germany). 2013. Vol. XL-1/W2. 423 p.
8. Potts D.R. Hyperspectral Imaging from Unmanned Aerial Vehicles for the Calibration and Validation of Earth Observation Satellites. Doctoral thesis. UCL (University College London). 2014. URL: <http://discovery.vcl.ac.uk/1451799/>
9. Scientists Begin Field Campaign for NOAA's GOES-16. URL: <https://www.nesdis.noaa.gov/content/scientists-begin-field-campaign-noaa%E2%80%99s-goes-16>.
10. Tsouvaltsidis C., Zaid Al Salem N., Benari G., Vrekalic D., Quine B. Remote spectral imaging using a low cost uav system. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* 2015. Vol. XL-1/W4. Pp. 25-31. URL: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-25-2015>, 2015.
11. Matese A., Toscano P., Gennaro S.F.D., Genesio L., Vaccari F.P., Primicerio J., Belli C., Zaldei A., Bianconi R., Gioli B. Intercomparison of UAV, Aircraft and Satellite Remote Sensing Platforms for Precision Viticulture *Remote Sens. Remote Sens.* 2015. Vol. 7. Issue 3. Pp. 2971-2990; doi:10.3390/rs70302971.
12. Von Bueren S.K., Burkart A., Hueni A., Rascher U., Tuoh M.P., Yule I.J. Deploying four optical UAV-based sensors over grassland: challenges and limitations. *Biogeosciences*. 2015. No. 12(1). Pp. 163-175.
13. Johnson L.F., Herwitz S., Dunagan S., Lobitz B., Sullivan D., Slye R. Collection of ultra high spatial and spectral resolution image data over California vineyards with a small UAV. *Proceedings of the 30th International Symposium on Remote Sensing of Environment*. 2003. Vol. 20. Pp. 845-849.
14. Krjuchkovskij V.V., Podmogil'nyj N.V. *Kontrol' realizacii prinjatyh reshenij zhiznennogo cikla reshenij* [Control of implementation of the accepted solutions of life cycle of decisions]. *Nauk ovi Don NTU*. Issue 148. Pp.96-103. (In Russian)
15. Temnikov F.E. *Teoreticheskie osnovy informacionnoj tehniki* [Theoretical bases of information equipment]. Moscow: Energiya, 1971. 424 p. (In Russian)

## INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Suleymanov T.I., PhD, Full Professor, Deputy Director on Science of National Aerospace Agency;  
Mamedov I.E., Aspirant of National Aerospace Agency.

FOR CITATION: Suleymanov T. I., Mamedov I. E. Information method for calibration and validation of satellite data using drones. *H&ES Research*. 2017. Vol. 9. No. 5. Pp. 19-24. (In Russian)





VIII Международная конференция

# Digital TV Russia 2017

Перспективы развития Ultra HD (4K и 8K)

**12 октября 2017**

отель «Азимут Москва Олимпик»  
Москва, Олимпийский пр., д. 18/1

**Digital TV Russia 2017 – главное событие  
второй половины 2017 года  
для профессионалов рынка ТВ и медиа:**

- **200+ делегатов**
- **50+ докладчиков – телеком-операторов, вещателей, представителей медиа- и ТВ-компаний, регуляторов и поставщиков оборудования и сервисов**
- **20+ экспонентов**
- **50+ инфопартнеров**
- **Поддержка ведущими отраслевыми ассоциациями России и мира**
- **Комплексная программа, экспертные дискуссии и мастер-сессии**
- **Отличные возможности для нетворкинга в центре российского профессионального ТВ и медиаобщества**

## Основные темы конференции:

- План и подробности отключения аналогового ТВ-вещания в России
- Либерализация требований к операторам платного вещания по присоединению к сети РТРС
- Практика реализации закона «О 21 кнопке»
- Создание экосистемы на базе технологии Ultra HD (4K)
- Особенности и преимущества технологии High Dynamic Range в сетях Ultra HD
- Next Generation Audio и другие подходы к улучшению качества звука в сетях Ultra HD
- Ultra HD (4K и 8K). Опыт пилотных проектов в РФ и за рубежом
- Роль орбитальных спутниковых группировок в массовом внедрении технологии Ultra HD. Перспективы роста потребностей в спутниковом ресурсе с учетом распространения технологии компрессии HEVC/H.265
- Перспективы широкого проникновения абонентского оборудования с поддержкой Ultra HD и HEVC
- Новые точки роста рынка платного ТВ в России в условиях стагнации традиционной пакетной модели
- Ситуация с появлением нового контента в Ultra HD и трансформация имеющегося контента в новый формат
- Интернет как новая универсальная среда распространения теле- и видеоконтента. Линейное vs нелинейное телесмотрение



Организатор:



Спонсор сессии:



# МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ И РАСЧЕТА ИНТЕГРИРОВАННОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СЕТЕВОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И ВОЙСКОВОГО РЕМОНТА ОБРАЗЦОВ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ ВОЗДУШНО-КОСМИЧЕСКИХ СИЛ

**ЯГОЛЬНИКОВ**  
**Дмитрий Владимирович<sup>1</sup>**

**ШАРОГЛАЗОВ**  
**Вадим Борисович<sup>2</sup>**

**ГРИГОРАЩЕНКО**  
**Игнатий Анатольевич<sup>3</sup>**

**ФИЛАТОВ**  
**Андрей Владимирович<sup>4</sup>**

---

<sup>1</sup>адъютант Военной академии воздушно-космической обороны имени Маршала Советского Союза Г. К. Жукова, г. Тверь, Россия, yagolnikov\_dv@mail.ru

<sup>2</sup>преподаватель Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия, sh.vadim.b@yandex.ru

<sup>3</sup>аспирант Тверского государственного технического университета, г. Тверь, Россия, rvdopira@yandex.ru

<sup>4</sup>к.т.н., старший преподаватель Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия, filatowav@rambler.ru

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** сетевое управление; динамическая интегрированная сетевая модель; ремонтно-диагностический комплекс; техническое обслуживание и войсковой ремонт; методика.

## АННОТАЦИЯ

Образцы вооружения и военной техники имеют высокую стоимость, повышенную конструктивную сложность, эксплуатируются в различных климатических условиях, ускоренно вырабатывают установленный ресурс. Жесткие требования к уровню готовности вооружения и военной техники, а также к оперативности устранения боевых повреждений обуславливают необходимость наличия и эффективного функционирования войскового компонента системы войскового ремонта, приближенной к боевым порядкам соединений и частей. В статье рассматривается предлагаемая авторами методика построения и расчета интегрированной динамической сетевой модели процессов технического обслуживания и войскового ремонта. Наличие в боевых порядках значительного количества старой техники с низкими показателями надежности, а также новой сложной техники, для которых не отработаны технологии технического обслуживания и войскового ремонта привели к значительным простоям в боеготовом состоянии. Сложность управления такого рода мероприятиями заключается как в сложности каждого комплекса мероприятий по техническому обслуживанию и войсковому ремонту, обусловленной определенной очередностью выполнения отдельных работ, так и пространственной и временной распределенностью мероприятий, выполняемых заданным составом мобильных ремонтно-диагностических модулей. Комплекс мероприятий на каждом объекте вооружения и военной техники может быть представлен сетевой моделью, а оптимизация управления такими проектами может быть проведена при помощи методов сетевого управления. Динамика прибытия ремонтно-диагностическими модулями различных типов на новые объекты вооружения и военной техники может быть отражена с помощью динамической интегрированной сетевой модели и введением понятия фиктивных работ первого и второго рода. Длительность фиктивных работ первого типа равна времени задержки прибытия соответствующих модулей после освобождения от предыдущих работ. Это позволяет учитывать динамику состояния сетевых моделей в процессе технического обслуживания и войскового ремонта. Длительность фиктивных работ второго типа равна нулю, т.к. они предназначены для учета зависимости работ, выполняемых различными ремонтно-диагностическими модулями. Разработанная методика позволяет оптимизировать и рассчитывать основные параметры сетевых моделей с учетом рационального назначения ремонтно-диагностических комплексов в процессе выполнения мероприятий технического обслуживания и войскового ремонта образцов вооружения и военной техники.

---

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Ягольников Д.В., Шароглазов В.Б., Григоращенко И.А., Филатов А.В. Методика построения и расчета интегрированной динамической сетевой модели процессов технического обслуживания и войскового ремонта образцов вооружения и военной техники Воздушно-космических сил // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 5. С. 26-32.

Мероприятия технического обслуживания и войскового ремонта включают большое количество взаимосвязанных работ (десятки и даже сотни), и для оптимизации выполнения мероприятий может быть использован проектный подход [1] базирующийся на методах сетевого управления [2–5].

Потребность в проведении технического обслуживания и войскового ремонта планируется на основе годовых норм расхода ресурсов изделий вооружения и военной техники, сроков их хранения, установленной периодичности технического обслуживания и межремонтных сроков эксплуатации ВВТ, планов подготовки воинских формирований, а также по результатам проведенного контроля параметров технического состояния изделий вооружения и военной техники и их составных частей.

Техническое диагностирование вооружения и военной техники (ВВТ) является одним из видов контроля параметров технического состояния и проводится в целях определения фактического технического состояния изделий вооружения и военной техники с установлением наиболее рациональных сроков и объемов работ по техническому обслуживанию и ремонту изделий ВВТ, мест их проведения (позиция, войсковой ремонтный орган, предприятие промышленности (ремонтное предприятие, сервисный центр)). Техническое диагностирование изделий ВВТ, как правило, проводится комплексной комиссией воинского формирования и предприятий промышленности в год, предшествующий проведению мероприятий технического обслуживания и войскового ремонта (ТО и ВР).

В результате диагностирования может оказаться, что необходимо провести широкий спектр различного вида работ на большом числе (как по типу, так и по количеству) образцов ВВТ, с применением для каждого вида работ отдельного мобильного модуля ремонтно-диагностического комплекса (РДК) с требуемыми характеристиками. Сложность управления такого рода мероприятий заключается как в сложности каждого комплекса мероприятий по ТО и ВР, обусловленной определенной очередностью осуществления некоторых работ (отдельные работы не могут начинаться пока другие работы не будут завершены), так и распределенностью мероприятий (в пространстве и времени), осуществляемых заданным составом модулей РДК. Комплекс мероприятий на любом изделии ВВТ можно представить определенной сетевой моделью. Соответственно, оптимизация управления такого рода проектами может быть проведена при помощи методов сетевого управления [6–7].

Сетевое управление (СУ) представляет собой метод организации планирования и оперативного управления сложными организационно-техническими (техническими) системами. В данном методе для логико-математического описания процесса управления и построения алгоритмов

расчета параметров указанного процесса применяется сетевая модель [1]. Сетевая модель позволяет руководителю работ масштабно и системно представлять весь комплекс работ (мероприятий), а также управлять процессом их реализации и осуществлять маневр ресурсами.

Применение метода СУ позволяет решить определенные задачи, возникающие перед руководителем проекта [2]:

- качественно распределить исполнителей; (позволяет выполнить проект в заданный срок);
- сформировать работы, наиболее сильно влияющие на срок завершения проекта, а также определить время выполнения мероприятий;
- определить необходимые ресурсы (в случае срыва некоторых работ);
- качественно распределить ресурсы (материалы, бюджет и рабочую силу).

Нахождение ответов на вышеперечисленные вопросы является важнейшей задачей при выполнении сложных и масштабных проектов, в том числе таких как техническое обслуживание и войсковой ремонт изделий ВВТ.

Указанные проекты обладают характерной особенностью, заключающейся в том, что они представляют собой совокупность отдельных элементарных работ, которые обуславливают друг друга невозможностью начала выполнения одних работ до завершения других.

Последовательность выполнения таких работ укрупненно или детально показывается на сетевом графике [8].

Взаимосвязи и логическая последовательность работ, необходимых для достижения намеченной цели отражаются в виде сетевой модели.

Сетевая модель (сетевой график) представляет собой конечный ориентированный граф, в котором одна вершина не имеет входных дуг или начальных вершин и одна вершина не имеет исходных дуг или конечных вершин.

Граф представляет собой схему, состоящая из заданных точек или вершин, соединенных некоторой системой линий. Отрезки, соединяющие вершины, называются ребрами или дугами графа. Ориентированным граф представляет собой граф, на котором стрелкой указаны направления всех его ребер или дуг. Графы носят название карт, лабиринтов, сетей, диаграмм. Исследование этих схем проводится методами теории, получившей название «теория графов».

Теория графов оперирует понятием пути, под которым понимается такая последовательность ребер, когда конец каждого предыдущего ребра совпадает с началом последующего. Контур означает конечный путь, у которого начальная вершина совпадает с конечной вершиной.

Таким образом, сетевой график представляет собой ориентированный граф без контуров, ребра которого имеют одни или несколько числовых характеристик.

Основными элементами графа являются: работа и событие [9–10].

Работа представляет собой процесс, приводящий к достижению намеченного результата, при этом требующий ресурсных затрат и имеющий протяжённость во времени.

Работа, не требующая временных и ресурсных затрат представляет собой фиктивную работу.

Событие представляет собой момент времени, завершения одних работ и начала других. Событие в отличие от работ, не имеет протяженности во времени и представляет собой только результат проведенных работ.

Событие можно считать наступившим тогда и только тогда, когда все входящие в него работы закончатся. В связи с этим, выходящие из некоторого события работы, не начнутся, пока все работы, входящие в это событие не будут завершены.

Сетевую модель процесса технического обслуживания и войскового ремонта представим в формализованном виде:

$$G = (B, R, \varphi, \Psi, \tau(r)) \quad (1)$$

где  $B$  — некоторое множество вершин или событий сетевой модели;

$R = \{r_1, r_2, \dots, r_k\}$  — некоторое множество работ, выполняемых на изделии ВВТ в ходе выполнения мероприятий по техническому обслуживанию и войсковому ремонту;

$\varphi: r \rightarrow (i, j)$  — функция инциденции, ставящая в соответствии каждой работе пару вершин или событий, начало и конец;

$\Psi$  — отношение предшествования работ определенно-го мероприятия. С этой целью необходимо по заданному перечню работ составить матрицу смежности. Матрица смежности представляет собой квадратную матрицу, размерность которой равна числу работ в комплексе, а строки и столбцы соответствуют работам [11];

$\tau(r)$  — длительность выполнения работ  $r \in R$ .

Элементы матрицы вычисляются по формуле:

$$\Psi = \Psi(r_i, r_j) = \begin{cases} 1, & \text{если работа } r_i \text{ — предшествует работе } r_j; \\ 0, & \text{в противоположном случае.} \end{cases} \quad (2)$$

Представление сетевых моделей в таком виде позволяет интегрировать в общую модель, описывающую процесс сложных проектов отдельные сетевые модели частных проектов [12].

Структурная схема методики построения и расчета интегрированной динамической сетевой модели процессов технического обслуживания и войскового ремонта изделий ВВТ противовоздушной обороны (ПВО) представлена на (рис.1).

При построении сетевых моделей следует руководствоваться основными правилами их построения [13]:

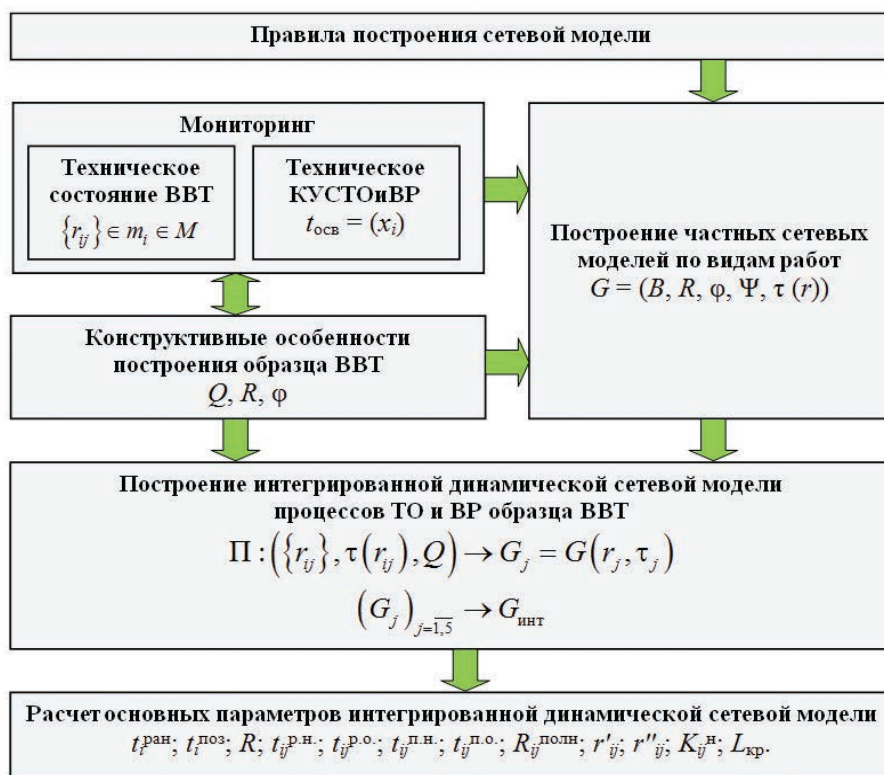


Рис. 1. Структурная схема методики

1. Номер любой вершины, предшествующей вершине сети должен быть меньше ее собственного номера.

2. В модели должны отсутствовать «лишние» висячие и тупиковые вершины. Висячие вершины — это вершины, которые не соответствуют исходным событиям и операциям. Тупиковые вершины — это вершины, которые не соответствуют завершающим событиям и операциям.

3. В сети должны отсутствовать контуры, петли и кратные дуги.

4. В сетевой модели должны быть только одна исходная и одна завершающая вершины.

5. Одной работой соединяются не более двух любых событий.

6. В случае наличия некоторых промежуточных работ сетевого графика могут, которые могут быть начаты до полного окончания предшествующей работы, то данную предшествующую работу следует разбить на несколько выполняемых последовательно работ, при этом каждая из этих работ должна быть достаточна для начала любой из ранее указанных.

7. В случае невозможности продолжения некоторой работы на каких-либо этапах без информации о результатах других работ, такую работу следует разделить на части, задействовав промежуточные события.

8. В случае необходимости до полного окончания работы видеть промежуточный результат, требующейся до

начала следующей работы, также необходимо работу разделить на части, введя промежуточные события.

9. С целью учета задержек времени выполнения каждого вида работ соответствующими РДК с учетом их занятости на предыдущих объектах работы и временных затрат на передвижение и переоснащение  $t_{\text{зад}}$  при построении интегрированной сетевой модели введем совокупность фиктивных работ  $R^{\Phi} = \{r_1^{\Phi}, r_2^{\Phi}, \dots, r_k^{\Phi}\}$  — выходящими из начальной вершины и выполняемыми фиктивными РДК  $x^{\Phi} \in X^{\Phi}$ . Данное правило представлено на (рис.2).

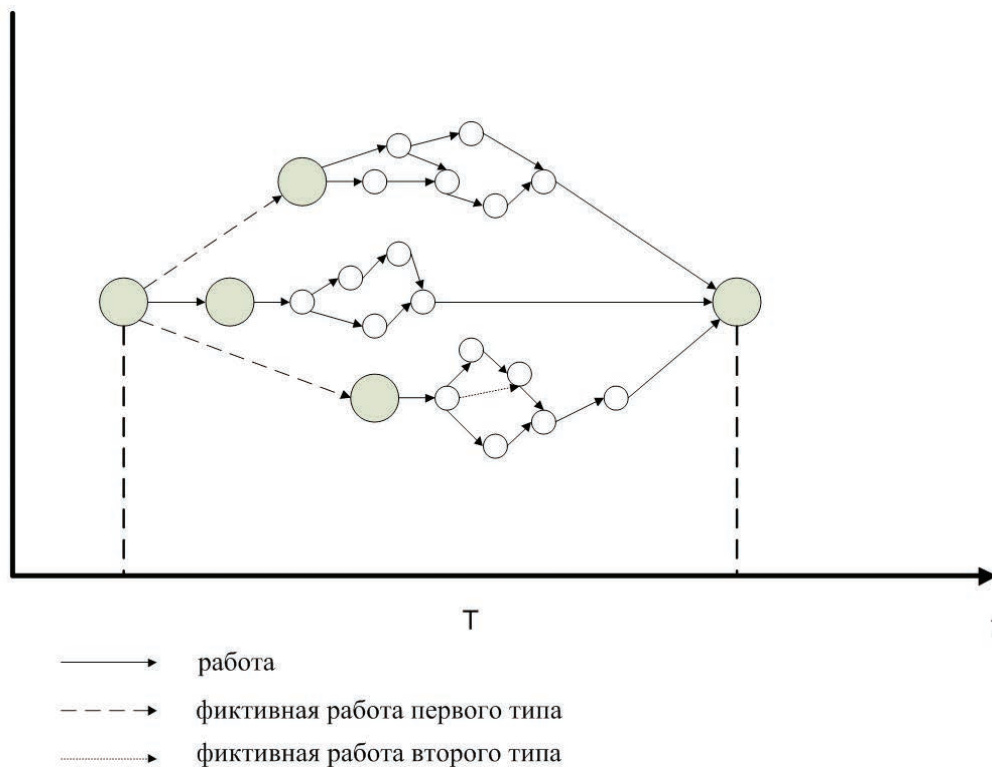
Количество таких фиктивных РДК будем считать неограниченным, а время выполнения работ  $r \in R$  бесконечно большим для отсекаания вариантов назначения.

Длительность фиктивных работ первого типа равна времени задержки прибытия соответствующих РДК после освобождения от предыдущих работ. Это позволяет учитывать динамику состояния сетевых моделей в процессе ТО и ВР.

Длительность фиктивных работ второго типа равна нулю, т.к. они предназначены для учета зависимости работ, выполняемых различными РДК.

В основе предложенной методики построения и расчета интегрированной динамической сетевой модели процессов ТО и ВР образцов ВВТ ПВО лежит алгоритм, который выглядит следующим образом:

**Шаг 1.** По сформированным результатам технического диагностирования (ТД) образцов ВВТ формируется



**Рис. 2.** Построение интегрированной динамической сетевой модели ТО и ВР образца ВВТ

множество мероприятий  $M = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$ , планируемых к проведению на образцах ВВТ  $s \in S_{\text{пл}} \in S$  в заданный период  $T = [0, T]$ . Результаты ТД корректируются с учетом годовых норм расхода ресурсов изделий ВВТ, сроков их хранения и установленной периодичности технического обслуживания и межремонтных сроков эксплуатации ВВТ.

**Шаг 2.** Для каждого мероприятия  $m_i \in M$  находятся перечни  $\{r_{ij}\} \in m_i$  время выполнения  $\tau(r_{ij})$  работ, проводимых в ходе планируемых мероприятий, и ранние, поздние сроки проведения мероприятий  $t_p(m_i)$ ,  $t_n(m_i)$ ,  $m_i \in M$ .

**Шаг 3.** Запрещается проводить мероприятия раньше раннего срока, и запрещается эксплуатировать изделие ВВТ после позднего срока запланированного мероприятия.

На основании функциональной структуры изделий  $Q$  ВВТ  $N_s(m_i) = n_i \in \{n_1, n_2, \dots, n_k\} \subseteq S_{\text{пл}}$  в соответствии с правилами 1–9 для каждого вида работ по привлекаемым типам РДК составляются сетевые модели.

$$P : (\{r_{ij}\}, \tau(r_{ij}), Q) \rightarrow G_j = G(r_j, \tau_j),$$

где  $\tau(r_{ij})$  — длительность работы  $r_{ij}$  в зависимости от трудоемкости и производительности РДК  $j$ -го типа.

**Шаг 4.** По результатам мониторинга состояния привлекаемых РДК, их загрузки на предыдущих мероприятиях, необходимых временных затрат на передвижение и переснастку (при необходимости) из моделей  $G_j$  формируется интегрированная динамическая сетевая модель комплекса работ мероприятия  $m_i$  с учетом правила 9 построения сетевой модели  $(G_j)_{j=1,5} \rightarrow G_{\text{итг}}$ .

**Шаг 5.** Для построенной интегрированной динамической сетевой модели с целью расчета временных затрат на выполнение требуемого мероприятия определяется критический путь, в том числе длина критического пути, а также производится расчет других основных параметров модели (рис.1):

1. **Ранний срок свершения события:**

$$t_h^{\text{ран}} = 0; t_i^{\text{ран}} = \tau_{hi} \text{ или } t_i^{\text{ран}} = \max \tau_i; t_i^{\text{ран}} = \max (t_i^{\text{ран}} + \tau_{ij}).$$

2. **Поздний срок свершения события:**

$$t_i^{\text{поз}} = \max(t_i^{\text{поз}} + \tau_{ij}).$$

3. **Резерв времени события:**  $R = t_i^{\text{поз}} - t_i^{\text{ран}}$ .

4. **Ранний срок начала работы:**

$$t_{hi}^{\text{р.н.}} = 0; t_{ij}^{\text{р.н.}} = \max t_{hi}^{\text{р.н.}}$$

5. **Ранний срок окончания работы:**

$$t_{hi}^{\text{р.о.}} = 0 + \tau_{hi}; t_{ij}^{\text{р.о.}} = t_{ij}^{\text{р.н.}} + \tau_{ij} \\ \text{или } t_{ij}^{\text{р.о.}} = t_i^{\text{ран}} + \tau_{ij}; \max t_{jk}^{\text{р.о.}} = t_{ij}^{\text{р.н.}} = \tau_{кр}$$

6. **Поздний срок начала работы:**

$$t_{jk}^{\text{п.н.}} = t_{jk}^{\text{п.о.}} - \tau_{jk}; t_{ij}^{\text{п.н.}} = t_{ij}^{\text{п.о.}} - \tau_{ij} \text{ или } t_{ij}^{\text{п.н.}} = t_j^{\text{поз}} - \tau_{ij}$$

7. **Поздний срок окончания работы:**

$$t_{ij}^{\text{п.о.}} = t_{jk}^{\text{п.н.}} \text{ или } t_{ij}^{\text{п.о.}} = t_j^{\text{поз}}, t_{ij}^{\text{п.о.}} = \min t_{jk}^{\text{п.н.}}$$

Для работ, находящихся на критическом пути, ранние и поздние сроки начала и окончания всегда равны

$$t_{ij}^{\text{р.н.}} = t_{ij}^{\text{п.н.}}, t_{ij}^{\text{р.о.}} = t_{ij}^{\text{п.о.}}$$

Работа считается критической, если выполняются следующие условия:  $t_{ij}^{\text{р.о.}} - t_{ij}^{\text{р.н.}} = t_{ij}^{\text{п.о.}} - t_{ij}^{\text{п.н.}} = t_{ij}$ .

8. **Полный резерв времени работы:**

$$R_{ij}^{\text{полн}} = t_j^{\text{поз}} - (t_i^{\text{ран}} + \tau_{ij}); R_{ij}^{\text{полн}} = t_{ij}^{\text{п.о.}} - t_{ij}^{\text{р.о.}} \\ \text{или } R_{ij}^{\text{полн}} = t_{ij}^{\text{п.н.}} - t_{ij}^{\text{р.н.}}$$

9. **Свободный резерв времени:**  $R_{ij}^{\text{полн}} = t_i^{\text{ран}} - (t_j^{\text{поз}} + \tau_{ij})$ .

10. **Частный резерв времени первого рода:**

$$r'_{ij} = t_j^{\text{поз}} - t_i^{\text{поз}} - \tau_{ij}$$

11. **Частный резерв времени второго рода:**

$$r''_{ij} = t_j^{\text{ран}} - t_i^{\text{ран}} - \tau_{ij}; r''_{ij} = t_{jk}^{\text{р.н.}} - t_{ij}^{\text{р.о.}} \\ \text{или } r''_{ij} = t_{jk}^{\text{п.н.}} - t_{ij}^{\text{п.н.}} - \tau_{ij}$$

12. **Резерв пути:**  $R_L = \tau_{кр} - \tau_{L\text{пут}}$

13. **Коэффициент напряженности работы:**

$$K_{ij}^{\text{н}} = \frac{\tau_{L\text{пут}} - \tau'_{крL\text{пут}}}{\tau_{кр} - \tau'_{крL\text{пут}}}$$

14. **Критический путь ( $L_{кр}$ ):**  $T_{кр} = T(L_{кр})$ .

Разработанная методика построения и расчета интегрированной динамической сетевой модели процессов технического обслуживания и войскового ремонта образцов ВВТ ПВО позволяет сформировать общий план и осуществить оперативное управление в ходе выполнения мероприятий технического обслуживания и войскового ремонта в ходе рассматриваемого периода планирования.

Новизна методики построения и расчета интегрированной динамической сетевой модели процессов технического обслуживания и войскового ремонта образцов ВВТ ПВО заключается в оптимизации модели осуществления мероприятий технического обслуживания и войскового ремонта изделий ВВТ, за счет интеграции множества работ, осуществляемых РДК одного вида (фиктивные работы второго рода) и учетом динамики прибытия всех необходимых РДК (фиктивные работы первого рода).

## Литература

1. *Заболотский В.П., Оводенко А.А., Степанов А.Г.* Математические модели в управлении. СПб.: СПбГУАП, 2001. 196 с.
2. *Петров А.Е.* Сетевые методы планирования производства. М.: МГТУ, 2011. 148 с.
3. Сетевые модели в управлении: Сборник статей / под ред. Д.А. Новикова, О.П. Кузнецова, М.В. Губко. М.: Эгвес, 2011. 443 с.
4. *Лазарев А.А., Мусатова Е.Г., Кварацхелия А.Г., Гафаров Е.Р.* Теория расписаний. Задачи управления транспортными системами. М.: Физический факультет МГУ, 2012. 159 с.
5. *Лазарев А.А.* Теория расписаний. Оценки абсолютной погрешности схема приближенного решения задач теории расписания. М.: МФТИ, 2008. 170 с.

6. Ягольников Д.В., Допира Р.В., Уханов А.А. Потеря оперативности оперативного восстановления, как важнейшего мероприятия сервисного обслуживания ВВТ ПВО // Сб. матер. междунар. военно-научной конференции «Основные направления адаптации объединенной системы ПВО государств — участников СНГ к решению задач воздушно-космической обороны», секция № 3. 2016. Т. 1. С. 93–98.

7. Кордюков Р.Ю., Ягольников Д.В., Сергиенко С.В., Шароглазов В.Б., Керницкий А.Г. Метод оперативного управления процессом ввода в строй объектов информационной системы ВКО // Т-Сотм: Телекоммуникации и транспорт. 2016. Т. 10. № 9. С. 53–56.

8. Кофман А., Дебазей Г. Сетевые методы планирования. М.: Прогресс, 1968. 156 с.

9. Бурков В.Н., Заложнев А.Ю., Новиков Д.А. Теория графов в управлении организационными структурами. М.: Синтез, 2001. 124 с.

10. Поленин В.И., Рябинин И.А., Свириц С.К., Гладкова И.А. Применение общего логико-вероятностного метода для анализа технических, военных и организационно-функциональных систем и вооруженного противоборства / под ред. А.С. Можаяева. СПб: Изд-во РАЕН, 2011. 416 с.

11. Geisberger R., Sanders P., Schultes D., Delling D. Contraction hierarchies: faster and simpler hierarchical routing in road networks // Processing Intern. Workshop on Experimental Algorithms (WEA). Springer, 2008. Pp. 319–333.

12. Goldberg A., Kaplan H., Werneck R. Better landmarks within reach // Processing Intern. Workshop on Experimental Algorithms (WEA). Lecture Notes in Comp. Sci. Springer. 2007. Vol. 4525. Pp. 38–51.

13. Заховицкий С.И., Радчик И.А. Математические методы сетевого планирования. М.: Наука, 1965. 296 с.

---

## METHOD OF CONSTRUCTION AND CALCULATION OF INTEGRATED DYNAMIC NETWORK MODEL OF PROCESSES OF TECHNICAL MAINTENANCE AND AIRBORNE REPAIR OF SAMPLES OF AEROSPACE FORCES

**DMITRY V. YAGOLNIKOV,**

Tver, Russia, yagolnikov\_dv@mail.ru

**VADIM B. SHAROGLAZOV,**

St. Petersburg, Russia, sh.vadim.b@yandex.ru

**IGNATIY A. GRIGORASCHENKO,**

Tver, Russia, rvdopira@yandex.ru

**ANDREY V. FILATOV,**

St. Petersburg, Russia, filatowav@rambler.ru

**KEYWORDS:** network management; dynamic integrated network model; repair and diagnostic complex; maintenance and military repair; methodology.

### ABSTRACT

Samples of weapons and military equipment have a high cost, heightened constructive complexity, are used in various climatic conditions, and rapidly develop the established resource. Strict requirements to the level of readiness of weapons and military equipment, as well as to the promptness of elimination of combat damage, necessitate the existence and effective functioning of the military component of the military repair system, which is close to the combat order of the air space force. In article discusses method of construction and calculation of integrated dynamic network model of processes of technical maintenance and airborne repair of samples of its air protection.

The presence in the battle formations of a significant amount of old equipment with low reliability indicators, as well as

new sophisticated equipment for which the technologies of maintenance and military repair have not been processed, led to significant downtime in a non-combat state.

The complexity of managing such events is both in the complexity of each set of measures for maintenance and military repair, due to a certain sequence of individual work, and the spatial and temporal distribution of activities performed by a specified composition of mobile repair and diagnostic modules. A network model can represent the complex of measures at every object of armament and military equipment, and optimization of management of such projects can be carried out using network management methods. The dynamics of the arrival of repair and diagnostic modules of various types to new objects of weapons and

military equipment can be reflected with the help of a dynamic integrated network model and the introduction of the concept of fictitious works of the first and second kind.

The duration of fictitious work of the first type is equal to the delay time of the arrival of the corresponding modules after release from previous works. This allows you to take into account the dynamics of the network models in the process of maintenance and military repair. The duration of fictitious work of the second type is zero, because they are designed to account for the dependence of work performed by various repair and diagnostic modules.

The developed methodology allows optimizing and calculating the basic parameters of network models, taking into account the rational designation of re-assembly and diagnostic complexes in the process of performing maintenance and military repair of weapons and military equipment.

## REFERENCES

1. Zabolotsky V.P., Ovodenko A.A., Stepanov A.G. *Matematicheskie modeli v upravlenii* [Mathematical models in management]. St. PetersburgSPb.: SPbGUAP, 2001. 196 p. (In Russian)
2. Petrov A.E. *Setevye metody planirovaniya proizvodstva* [Network methods of production planning]. Moscow: MGGU, 2011. 148 p. (In Russian)
3. Novikova D.A., Kuznetsova O.P., Gubko M.V. (Eds.). *Setevye modeli v upravlenii: Sbornik statey* [Network models in management: Collection of articles]. Moscow: Egves, 2011. 443 p. (In Russian)
4. Lazarev A.A., Musatova E.G., Kvaratskhelia A.G., Gafarov E.R. *Teoriya raspisaniy. Zadachi upravleniya transportnymi sistemami* [Theory of schedules. Problems of transport systems management]. Moscow: Physics Faculty of Moscow State University, 2012. 159 p. (In Russian)
5. Lazarev A.A. *Teoriya raspisaniy. Otsenki absolyutnoy pogreshnosti skhema priblizhennogo resheniya zadach teorii raspisaniya* [Theory of schedules. Estimates of the absolute error of the approximate solution of problems in scheduling theory]. Moscow: MIPT, 2008. 170 p. (In Russian)
6. Yagolnikov D.V., Dopira R.V., Ukhanov A.A. *Poterya operativnosti operativnogo vosstanovleniya, kak vazhneyshego meropriyatiya servisnogo obsluzhivaniya VVT PVO* [Loss of the operability of operational recovery, as the most important maintenance event for of arms and military equipment of anti-aircraft defense]. *Sbornik materialov mezhdunarodnoy voenno-nauchnoy konferentsii «Osnovnye napravleniya adaptatsii ob"edinennoy sistemy PVO gosudarstv – uchastnikov SNG k resheniyu zadach vozdushno-kosmicheskoy oborony»*,

*seksiya №3* [Collected materials of the international military scientific conference "The main directions of adaptation of the united air defense system of the CIS member states to the solution of aerospace defense tasks", section 3]. 2016. T. 1. Pp. 93-98. (In Russian)

7. Kordyukov R.Yu., Yagolnikov D.V., Sergienko S.V., Sharoglazov V.B., Kernitsky A.G. Method of the operational management input process in the system of objects of information system aerospace defense. *T-Comm*. 2016. T. 10. No. 9. Pp. 53-56. (In Russian)

8. Kofman A., Debazey G. *Setevye metody planirovani* [Network planning methods]. Moscow: Progress, 1968. 156 p (In Russian)

9. Burkov V.N., Zalozhnev A.Yu., Novikov D.A. *Teoriya grafov v upravlenii organizatsionnymi strukturami* [Graph theory in organizational structure management]. Moscow, Sinteg Publ., 2001, 124 p. (In Russian)

10. Polenin V.I., Ryabinin I.A., Svirin S.K., Gladkova I.A., Mozhaev A.S. (Ed.). *Primenenie obshchego logiko-veroyatnostnogo metoda dlya analiza tekhnicheskikh, voennykh i organizatsionno-funktsionalnykh sistem i vooruzhshonnogoprotivoborstva* [Application of common logical and probabilistic method to analyze technical, military, organizational and functional systems and armed counteraction]. Russian academy of natural sciences Publ., St. Petersburg, 2011, 416 p. (In Russian)

11. Geisberger R., Sanders P., Schultes D., Delling D. Contraction hierarchies: faster and simpler hierarchical routing in road networks. Proc. Intern. Workshop on Experimental Algorithms (WEA). Springer, 2008. Pp. 319-333.

12. Goldberg A., Kaplan H. & Werneck R. Better landmarks within reach. Proc. Intern. Workshop on Experimental Algorithms (WEA). Lecture Notes in Comp. Sci. Springer, 2007. Vol. 4525. Pp. 38-51.

13. Zakhovitsky S.I., Radchik I.A. *Matematicheskie metody setevogo planirovaniya* [Mathematical methods of network planning]. Moscow: Nauka, 1965. 296 p. (In Russian)

## INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Yagolnikov D.V., Postgraduate Student of Military Academy of Aerospace Defense;

Sharoglazov V.B., Lecturer at the Department of the Organization of Operation and Technical Providing Arms of Military and Special Equipment of Military Space Academy; Grigoraschenko I.A., Postgraduate at the Department of the Information Systems of Tver State Technical University.

Filatov A.V., PhD, Senior Lecturer at the Department of the Organization of Operation and Technical Providing Arms of Military and Special Equipment of Military Space Academy.

**FOR CITATION:** Yagolnikov D.V., Sharoglazov V.B., Grigoraschenko I.A., Filatov A.V., Method of construction and calculation of integrated dynamic network model of processes of technical maintenance and airborne repair of samples of Aerospace space force. *H&ES Research*. 2017. Vol. 9. No. 5. Pp. 26-32. (In Russian)



# МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ ВЛИЯНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ВООРУЖЕНИЯ, ВОЕННОЙ И СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

## ГУСЕНИЦА

Ярослав Николаевич<sup>1</sup>

## КРАВЦОВ

Александр Николаевич<sup>2</sup>

## МАЛАХОВ Александр

Владимирович<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup>к.т.н., преподаватель Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия, yaromir226@mail.ru

<sup>2</sup>к.т.н., доцент, начальник кафедры Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия, kap1970@bk.ru

<sup>2</sup>начальник отделения Филиала Главного научного метрологического центра Минобороны России, г. Москва, Россия, sanya-mal1@yandex.ru

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** вооружение, военная и специальная техника; эффективность применения; метрологическое обеспечение; стохастический граф; модель объекта измерений; модель средства измерений; модель применения.

## АННОТАЦИЯ

В работе проведен анализ роли и места метрологического обеспечения на стадиях жизненного цикла образца вооружения, военной и специальной техники. Обоснована актуальность развития военной метрологии. Проведен обзор научных работ, направленных на развитие военной метрологии в России и за рубежом, по результатам которого выявлено, что вопрос оценивания влияния метрологического обеспечения на эффективность применения вооружения, военной и специальной техники освещен недостаточно. Предложен метод, позволяющий компенсировать указанный пробел в военной метрологии. Описана общая схема метода, предполагающая определение вероятности успешного выполнения мероприятий по метрологическому обеспечению образца вооружения, военной и специальной техники, формирование модели объекта измерений, формирование моделей средств измерений, установленных на образце вооружения, военной и специальной техники в качестве составной части, оценивание эффективности применения образца вооружения, военной и специальной техники. Для определения вероятности успешного выполнения мероприятий по метрологическому обеспечению образца вооружения, военной и специальной техники разработана сетевая математическая модель, основанная на подходе к количественному оцениванию работоспособности сложной системы. Сформулирован подход к формированию модели объекта измерений, а также подход к формированию моделей средств измерений, установленных на образце вооружения, военной и специальной техники в качестве составных частей. Выработаны рекомендации по выбору моделей, пригодных для оценивания эффективности применения образца вооружения, военной и специальной техники. Приведен расчетный пример, наглядно демонстрирующий влияние метрологического обслуживания средств измерений на эффективность поражения танка вооружением наземной артиллерией. В заключении описана практическая значимость предлагаемого метода и дальнейшее направление его развития.

---

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Гусеница Я.Н., Кравцов А.Н., Малахов А.В. Метод оценивания влияния метрологического обеспечения на эффективность применения вооружения, военной и специальной техники // Научные исследования в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 5. С. 33-41.

Совершенствование существующих и создание перспективных видов вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ), форм и способов ведения военных действий ставит поддержание боеготовности и боеспособности войск (сил) в зависимость от уровня метрологического обеспечения [3].

Одной из основных целей метрологического обеспечения является обеспечение эффективности применения ВВСТ. Достижение данной цели возможно только при условии успешного выполнения определенных мероприятий по метрологическому обеспечению ВВСТ на всех этапах жизненного цикла, начиная от формирования исходных

требований к образцам и заканчивая снятием их с эксплуатации и списанием (рис. 1) [3].

Научные основы метрологического обеспечения ВВСТ составляют историческая, теоретическая и военная метрология (рис. 2) [3].

Развитие военной метрологии активно ведется в России и за рубежом. На текущий момент времени существуют работы, имеющих теоретическую и практическую значимость для военной метрологии [1, 5, 10–22]. Вместе с тем, анализ отечественной и зарубежной литературы показывает, что вопрос формализации влияния метрологиче-

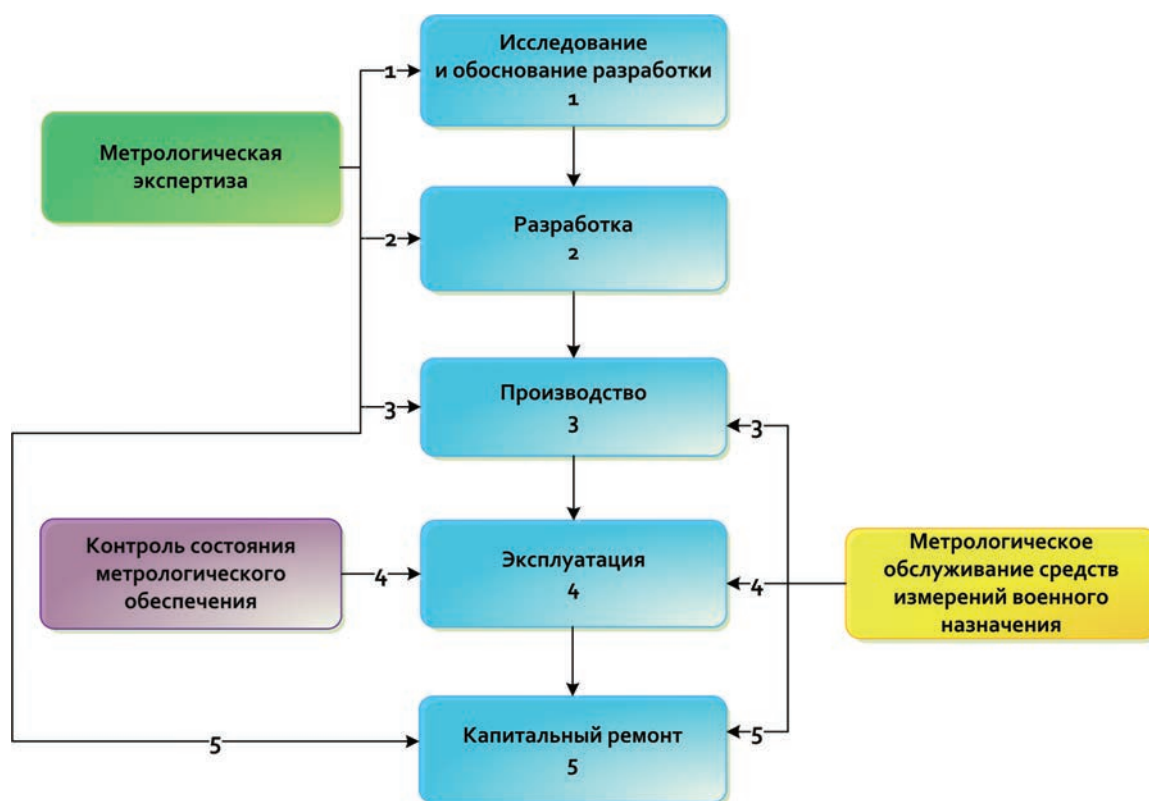


Рис. 1. Мероприятия по метрологическому обеспечению, оказывающие влияние на эффективность применения ВВСТ



Рис. 2. Содержание метрологического обеспечения ВВСТ



Рис. 3. Схема метода оценивания влияния метрологического обеспечения на эффективность применения ВВСТ

ского обеспечения на эффективность применения ВВСТ не достаточно освещен. Поэтому целью данной статьи является разработка метода оценивания влияния метрологического обеспечения на эффективность применения ВВСТ.

Предлагаемый метод предполагает выполнение нижеперечисленных этапов (рис. 3).

1. Определение вероятности  $R$  успешного выполнения мероприятий по метрологическому обеспечению образца ВВСТ.

2. Формирование модели объекта измерений.

3. Формирование моделей средств измерений, установленных на образце ВВСТ в качестве составной части.

4. Оценивание эффективности применения образца ВВСТ.

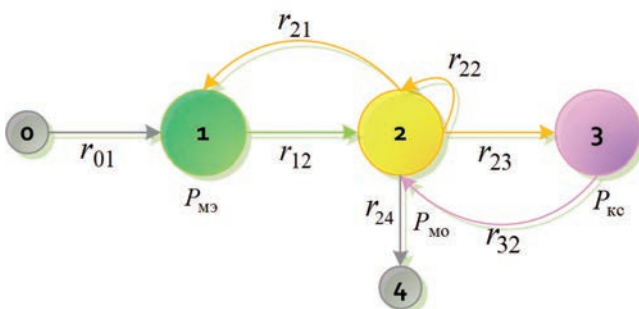


Рис. 4. Стохастический граф модели метрологического обеспечения ВВСТ

Для определения вероятности  $R$  разработана модель метрологического обеспечения образца ВВСТ, которая базируется на подходе к количественному оцениванию работоспособности сложной системы, предложенном в работе [6, 8].

Согласно данному подходу для получения вероятности успешного выполнения мероприятий по метрологическому обеспечению образца ВВСТ строится сетевая математическая модель (рис. 4).

Узлы 0 и 4 являются истоком и стоком сетевой математической модели. Остальные узлы соответствуют мероприятиям по метрологическому обеспечению ВВСТ, которые следуют один за другим. Вероятности их успешного выполнения обозначены через  $P_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ . Узел 1 соответствует метрологической экспертизе, которая проводится на ранних стадиях жизненного цикла образца с вероятностью  $r_{01}$  и во время капитального ремонта с вероятностью  $r_{21}$ . Узел 2 соответствует метрологическому обслуживанию средств измерений, установленных на образце в качестве составной части. Данное мероприятие проводится после производства образца с вероятностью  $r_{12}$  и в течение всей эксплуатации образца с вероятностями  $r_{22}$  и  $r_{32}$ . Узел 3 соответствует контролю состояния метрологического обеспечения, которое также проводится в течение всей эксплуатации образца, но с вероятностью  $r_{23}$ . На вероятности переходов накладываются следующие ограничения:  $r_{01}=1$ ,  $r_{12}=1$ ,  $r_{21}+r_{22}+r_{23}+r_{24}=1$ ,  $r_{32}=1$ .

Матрица переходов между узлами графа  $G$  имеет следующий вид:

$$G = \begin{pmatrix} 0 & r_{01} \cdot P_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_{12} \cdot P_{<M} & 0 & 0 \\ 0 & r_{21} \cdot P_{<>} & r_{22} \cdot P_{<>} & r_{23} \cdot P_{<>} & r_{24} \cdot P_{<>} \\ 0 & 0 & r_{32} \cdot P_{:A} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Как и в работе [8], используется понятие шага, отражающего единичный переход между мероприятиями по метрологическому обеспечению образца ВВСТ. Для того чтобы найти вероятность успешного выполнения мероприятий по метрологическому обеспечению образца за два шага, необходимо просуммировать с соответствующими вероятностями произведения вероятностей по всем путям, содержащим два узла. Это достигается путем возведения матрицы  $G$  в квадрат. Возводя матрицу  $G$  в куб, можно получить вероятность успешного выполнения мероприятий по метрологическому обеспечению образца за три шага и т.д.

Далее необходимо построить матрицу

$$T = I + G(t) + G^2(t) + \dots = I(I - G(t))^{-1} - 1,$$

где  $I$  — единичная матрица.

Теперь необходимо построить матрицу  $(I - G)$ :

$$(I - G) = \begin{pmatrix} 1 & -r_{01} \cdot P_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -r_{12} \cdot P_{<M} & 0 & 0 \\ 0 & -r_{21} \cdot P_{<>} & 1 - r_{22} \cdot P_{<>} & -r_{23} \cdot P_{<>} & -r_{24} \cdot P_{<>} \\ 0 & 0 & -r_{32} \cdot P_{:A} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Тогда в соответствии с работой [9] вероятность успешного выполнения всех мероприятий по метрологическому обеспечению образца ВВСТ будет равна:

$$P_{\text{МЛО}} = \frac{Q}{R},$$

где  $Q$  — алгебраическое дополнение элемента с номером  $(4, 0)$  матрицы  $G$ ;  $R$  — главный определитель этой матрицы.

Для получения конкретных результатов вероятность  $P_1$  принимается равной единице, а значения вероятностей  $P_{\text{мз}}, P_{\text{мо}}, P_{\text{кц}}$  могут быть получены, например, на основе использования модели и методик, представленных в работах [6, 11]. Однако при проведении различных исследований могут применяться и другие методы и модели расчета вероятностей успешного выполнения тех или иных мероприятий по метрологическому обеспечению.

Модель объекта измерений является упрощенным представлением образца ВВСТ [3]. Она относится к информационным моделям, т.е. представляет собой совокупность информации, характеризующей существенные свойства образца ВВСТ [2]. К существенным свойствам относятся физические величины, которые влияют на точность выполнения образцом ВВСТ задачи по предназначению. Исчерпывающий набор физических величин представлен в работе [3]. При этом каждая физическая величина может принимать значение, ограниченное метрологическими характеристиками средств измерений. Из всего набора физических величин выбираются те, которые непосредственно связаны с результатом применения образца ВВСТ. Следовательно, для формирования модели объекта измерений необходимо перечислить физические величины, влияющие на точность выполнения образцом ВВСТ задачи по предназначению. Например, для вооружения наземной артиллерии простейшая модель объекта измерений представлена в табл. 1.

Модели средств измерений, как и модель объекта измерений, относятся к информационным моделям. На практике они используются для правильного применения средств измерений, а также обработки опытных данных [3]. Каждая модель средства измерений представляет собой совокупность его метрологических характеристик, которые реализуют связь с моделью объекта измерений и моделью применения образца ВВСТ. Таким образом, для формирования моделей средств измерений, установленных на образце ВВСТ в качестве составной части, необходимо определить их метрологические характеристики. При этом среди всей номенклатуры

Таблица 1

Пример простейшей модели объекта измерений

Характеристики, влияющие на точность применения вооружения наземной артиллерии	Величина		Единица		
	Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение	
				международное	русское
Расстояние до цели	Длина	L	метр	m	м
Скорость ветра	Скорость	LT <sup>1</sup>	метр в секунду	m/s	м/с
Курсовой угол цели	Плоский угол	1	радиан	rad	рад

Таблица 2

Пример моделей средств измерений, установленных на вооружении наземной артиллерии в качестве составной части

Характеристики, влияющие на точность применения вооружения наземной артиллерии	Средства измерений	
	Наименование	Относительная погрешность
Расстояние до цели	Дальномер	0,25%
Скорость ветра	Комплект метеорологический	5%
Курсовой угол цели	Угломер	5%

метрологических характеристик рекомендуется выбирать характеристики погрешностей средств измерений. Например, для вооружения наземной артиллерии простейшие модели объекта измерений представлены в табл. 2.

Для оценивания эффективности применения образца ВВСТ на практике используют различные аналитические и имитационные модели, представленные, например, в [4, 7, 9]. При этом в основе имеющихся на данный момент моделей лежат различные подходы к математическому описанию применения ВВСТ, начиная от построения системы дифференциальных уравнений, представления процесса функционирования ВВСТ как системы массового обслуживания и заканчивая использованием экспертных оценок. Существующие модели в зависимости от используемой математической теории имеют свои ограничения и допущения, поэтому не всегда пригодны для формализации влияния мероприятий по метрологическому обеспечению на эффективность применения ВВСТ. В связи с чем, в качестве моделей применения ВВСТ следует выбирать те, которые основаны на классической теории вероятностей. В данных моделях в роли показателя эффективности применения ВВСТ, как правило, выступает либо вероятность выполнения задачи по предназначению, либо математическое ожидание полученного эффекта в результате применения ВВСТ. Такие показатели должны удовлетворять требованиям, сформированным в рамках теории эффективности целенаправленных процессов [7]:

— представительность, т.е. позволяет оценивать эффективность по достижению основной (а не второстепенных) цели;

— критичность, т.е. чувствительность к изменениям исследуемых факторов;

— комплексность, т.е. позволяет охарактеризовать степень достижения цели без привлечения других показателей;

— стохастичность, т.е. позволяет учитывать неопределенность условий целенаправленных процессов, которая обусловлена воздействием случайных факторов.

Например, в работе [9] одним из показателей эффективности используется вероятность поражения одиночной

цели одиночным выстрелом наземного артиллерийского вооружения, которая рассчитывается по следующей модели:

$$P_3 = \hat{\Phi} \left( \frac{l_x}{E_{x_2}} \right) \hat{\Phi} \left( \frac{l_y}{E_{y_2}} \right),$$

где  $\hat{\Phi}(\ast)$  — приведенная функция Лапласа;  $l_x, l_y$  — приведенные размеры цели по дальности и направлению;  $E_{x_2}, E_{y_2}$  — срединные ошибки выстрела по дальности и направлению;

Срединные ошибки выстрела по дальности и направлению рассчитываются по следующей формуле:

$$E_{x_n(y_n)} = \sqrt{E_{x(y)}^2 + B_{x(y)}^2},$$

где  $E_{x(y)}^2$  — характеристики ошибок подготовки исходных данных;  $B_{x(y)}^2$  — характеристики ошибок технического рассеивания снарядов.

В свою очередь характеристики ошибок подготовки исходных данных определяются по следующей формуле:

$$E_{x(y)} = \sqrt{E_{x_{оп}(y_{оп})}^2 + E_{1_{x(y)}}^2 + E_{2_{x(y)}}^2 + E_{3_{x(y)}}^2},$$

где  $E_{x_{оп}(y_{оп})}$  — ошибки, повторяющиеся для всех выстрелов данного наземного артиллерийского вооружения;  $E_{1_{x(y)}}$  — ошибка определения дальности до цели;  $E_{2_{x(y)}}$  — ошибка определения скорости ветра;  $E_{3_{x(y)}}$  — ошибка определения курсового угла цели.

Ошибки  $E_{1_{x(y)}}$ ,  $E_{2_{x(y)}}$ ,  $E_{3_{x(y)}}$  зависят от характеристик погрешностей средств измерений, входящих в состав наземного артиллерийского вооружения. Для их расчета можно использовать следующую формулу:

$$E_{i_{x(y)}} = \frac{E_{x_{оп}(y_{оп})} \cdot \Delta_i}{100\%}, i = \overline{1, 3}, \quad (1)$$

где  $E_{i_{x(y)}}$  — ошибки определения дальности до цели, определения скорости ветра, определения скорости цели, опре-

деления курсового угла цели;  $\Delta_i$  — относительная погрешность  $i$ -го средства измерений.

С учетом мероприятий по метрологическому обеспечению образца ВВСТ выражение (1) преобразуется к следующему виду:

$$E_{i(x,y)} = (1 - P_{\text{МЛО}}) \cdot \frac{E_{x_{\text{оп}}(y_{\text{оп}})} \cdot \Delta_i}{100\%} + \frac{E_{y_{\text{оп}}(x_{\text{оп}})} \cdot \Delta_i}{100\%}, i = \overline{1,3}. \quad (2)$$

Полученное выражение отражает зависимость ошибок подготовки исходных данных от мероприятий по метрологическому обеспечению наземного артиллерийского вооружения.

Далее представлен пример оценивания влияния метрологической экспертизы на эффективность поражения танка одиночным выстрелом из наземного артиллерийского вооружения. Пусть имеются следующие исходные данные: приведенные размеры танка равны  $l_x = 3,5$  м и  $l_y = 2,5$  м; характеристики ошибок технического рассеивания снарядов —  $B_x = B_y = 30$  м; ошибки, повторяющиеся для всех выстрелов данного наземного артиллерийского вооружения —  $E_{x_{\text{оп}}} = 10$  м и  $E_{y_{\text{оп}}} = 3$  м. Модель объекта измерений представлена в табл. 1. Модели средств измерений, входящих в состав наземного артиллерийского вооружения приведены в табл. 2. С помощью представленных выше моделей проведено исследование зависимости уровня эффективности поражения танка одиночным выстрелом из наземного артиллерийского вооружения от вероятности успешного выполнения метрологической экспертизы. Анализ графика на рис. 5 показывает, уровень эффективности поражения танка одиночным выстрелом из наземного артиллерийского

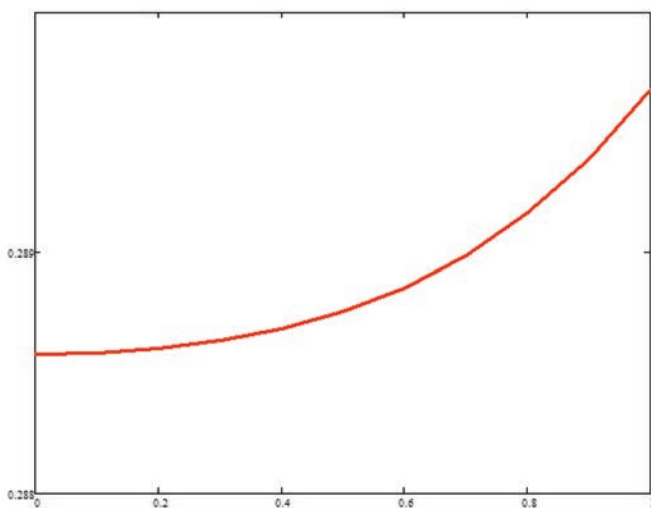


Рис. 5. График зависимости уровня эффективности поражения танка одиночным выстрелом из наземного артиллерийского вооружения от вероятности успешного выполнения метрологической экспертизы

го вооружения растет при высокой вероятности успешного выполнения метрологической экспертизы. Однако, рост уровня эффективности поражения танка одиночным выстрелом из наземного артиллерийского вооружения остается не достаточно высоким, т.к. зависит не только от метрологического, но и других видов обеспечения.

Аналогичным образом могут быть получены графики зависимостей уровня эффективности поражения танка одиночным выстрелом из наземного артиллерийского вооружения от вероятности успешного выполнения остальных мероприятий по метрологическому обеспечению.

Таким образом, разработанный метод, в отличие от имеющихся, позволяет оценить влияние метрологического обеспечения на эффективность применения вооружения, военной и специальной техники. Предлагаемый метод может быть использован при разработке сложных комплексов метрологического обеспечения вооружения, военной и специальной техники, методов и технических средств метрологического обеспечения войск (сил) в мирное время и на особый период, военно-метрологического сопровождения жизненного цикла и метрологической экспертизы вооружения, военной и специальной техники, концептуальных положений, военно-научном и технико-экономическом обосновании метрологического обеспечения вооружения, военной и специальной техники.

Дальнейшее направление развития метода связано с разработкой методик, позволяющих определять влияние метрологического обеспечения на конкретные виды вооружения, военной и специальной техники, а также методик, позволяющих определять мероприятия по метрологическому обеспечению, оказывающие наиболее существенный вклад в эффективность применения вооружения, военной и специальной техники.

## Литература

1. Гузенко В.Л., Миронов А.Н., Миронов Е.А., Шестопалова О.Л. Оценивание влияния точности определения значений границ контрольных допусков на качество функционирования оборудования непрерывного применения // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 5–2. С. 232–238.
2. Гусеница Я.Н. Информационные технологии в области метрологического обеспечения войск (сил). Часть 3. Информационное обеспечение автоматизированных систем. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2015. 70 с.
3. Метрология, стандартизация и сертификация / под ред. А.Н. Дорохова. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2016. 153 с.
4. Гусеница Я.Н., Завалишин М.А., Пестун У.А. Моделирование информационных средств контроля космического пространства, функционирующих в условиях динамически изменяющейся космической обстановки // Труды

Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2011. № 632. С. 44–49.

5. Гусеница Я.Н., Малахов А.В. Имитационное моделирование реконфигурируемых метрологических комплексов // Сборник научно-методических трудов I Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы развития вооружения, военной и специальной техники противовоздушной и противоракетной обороны, Космических войск Воздушно-космических сил». 2016. С. 102–116.

6. Мышко В.В., Кравцов А.Н., Копкин Е.В., Чукуров В.А. Теоретические основы и методы оптимизации анализа технического состояния сложных систем: монография. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2013. 303 с.

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

8. Смагин В.А., Шерстобитов С.А. Оценка длительности и количества информационной работы в цикле управляющей сети // Информация и космос. 2016. № 1. С. 75–79.

9. Фендриков Н.М., Яковлев В.И. Методы расчетов боевой эффективности вооружения. М.: Воениздат, 1971. 224 с.

10. Шерстобитов С.А. Методика формирования требований к системе контроля функционирования автоматизированного рабочего места по проверке средств измерений // Информатика и системы управления. 2017. № 1 (51). С. 95–99.

11. Чернов И.В. Совершенствование методики определения азимутов с использованием лазерных гироскопов // Информация и космос. 2016. № 4. С. 121–126.

12. Kumar U.P., Somasundaram U., Kothiyal M.P., Mohan N.K. Microscopic TV Holography and Interferometry for

Surface Profiling and Vibration Amplitude Measurement in Microsystems // Defence Science Journal. 2011. Vol. 61. No. 5. Pp. 491–498.

13. Sign R., Nagarajan R., Poonia K., Mohan H., Mangal-hara J.P. High Temperature Calibration of Thermal Imagers for Infrared Measurements on Military Platforms // Defence Science Journal. 2017. Vol. 67. No. 2. Pp. 188–192.

14. Decker R., Duca M., Spickert-Fulton S. Measurement of bullet impact conditions using automated in-flight photography system // Defence Technology. 2017. Vol. 13. Pp. 288–294.

15. Chiribella G. Optimal networks for quantum metrology: semidefinite programs and product rules // New Journal of Physics. 2012. Vol. 14. 19 p.

16. Decker R., Duca M., Spickert-Fulton S. Measurement of bullet impact conditions using automated in-flight photography system // Defence Technology. 2017. Vol. 13. Pp. 288–294.

17. DoD automatic test systems executive directorate. DoD automatic test systems master plan. 2012. 31 p.

18. Errea S., Grigor J., King D.F., Matis G., McHugh S., McKechnie J., Nehring B. Advanced E-O Test Capability for U.S. Army Next Generation Automatic Test System // Proc. of SPIE. 2015. Vol. 9452. Pp. 1–10.

19. Knott P.A. A search algorithm for quantum state engineering and metrology // Journal of Physics. 2016. Vol. 18. 10 p.

20. Lazzarin A., Orsi E., Sanfilippo U. Statistical analysis on experimental calibration data for flowmeters in pressure pipes // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 882. 10 p.

21. Milton A.F., Barone F.B., Krueger M.R. Influence of nonuniformity on infrared focal plane array performance // Optical Engineering. 1985. Vol. 24(5). Pp. 855–862.

22. O'Connell J. Metrology: The Creation of Universality by the Circulation of Particulars // Social Studies of Science. 1993. Vol. 23. Pp. 129–173.



## METHOD OF ESTIMATION OF INFLUENCE OF METROLOGICAL SUPPORT ON EFFICIENCY OF APPLICATION OF ARMAMENT, MILITARY AND SPECIAL EQUIPMENT

**YAROSLAV N. GUSENITSA,**

St-Peterburg, Russia, yaromir226@mail.ru

**ALEKSANDR N. KRAVTSOV,**

St-Peterburg, Russia, kan1970@bk.ru

**ALEKSANDR V. MALAKHOV,**

Moscow, Russia, sanya-mal1@yandex.ru

**KEYWORDS:** weapons, military and special equipment; effectiveness of application; metrological support; stochastic graph; model of the measurement object; model of measuring instrument; application model.

### ABSTRACT

The work analyzes the role and place of metrological support at the stages of the life cycle of the weapon, military and especially technical equipment. The urgency of the development of military metrology is substantiated. The review of scientific works aimed at the development of military metrology in Russia and abroad. The insufficient illumination of the issue related to the assessment of the effect of metrological support on the effectiveness of the use of weapons, military and special equipment is revealed. A method is proposed that makes it possible to compensate for this gap in military metrology. The general scheme of the method is described, which assumes the determination of the probability of successful fulfillment of measures for metrological support of a sample of weapons, military and special equipment, the formation of a model of a measurement object, the formation of models of measuring instruments installed on a sample of weapons, military and special equipment as an integral part, weapons, military and special equipment. To determine the probability of successful implementation of measures for metrological provision of a weapon, military and special equipment, a network mathematical model based on the approach to quantitative assessment of the operability of a complex system was developed. An approach to the formation of a measurement object model is formulated, as well as an approach to the formation of models of measuring instruments installed on a model of weapons, military and special equipment as an integral part. Recommendations were made on the choice of models suitable for assessing the effectiveness of the use of a sample of weapons, military and special equipment. A computational example is presented that clearly demonstrates the effect of metrological maintenance of measuring instruments on the effectiveness of tank damage by arming with ground artillery. In conclusion, the practical

significance of the proposed method and the further direction of its development are described.

### REFERENCES

1. Guzenko V.L., Mironov A.N., Mironov E.A., Shestopalova O.L. *Ocenivanie vlijanija tochnosti opredelenija znachenij granic kontrol'nyh dopuskov na kachestvo funkcionirovanija oborudovanija nepreryvnogo primenenija* [Valuation of influence accuracy of border control values tolerance on the quality of functioning equipment for continuous use]. *Modern high technologies*. 2016. No. 5-2. Pp. 232-238. (In Russian)
2. Gusenitsa Y.N. *Informacionnye tehnologii v oblasti metrologicheskogo obespechenija vojsk (sil). Chast' 3. Informacionnoe obespechenie avtomatizirovannyh sistem* [Information technology in the field of metrological support of troops (forces). Part 3. Information support of automated systems]. Saint-Petersburg.: Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, 2015. 70 p. (In Russian)
3. Dorokhov A.N. (Ed.). *Metrologija, standartizacija i sertifikacija* [Metrology, standardization and certification]. Saint-Petersburg: Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, 2016. 153 p. (In Russian)
4. Gusenitsa Y.N., Zavalishin M.A., Pestun U.A. *Modelirovanie informacionnyh sredstv kontrolja kosmicheskogo prostranstva, funkcionirujushhij v uslovijah dinamicheskij izmenjajushhejsja kosmicheskij obstanovki* [Modeling of information means control of outer space, functioning in the conditions of dynamically changing space environment]. Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky. 2011. No. 632. Pp. 44-49. (In Russian)
5. Malakhov A.V., Gusenitsa Y.N. *Imitacionnoe modelirovanie rekonfiguriruemih metrologicheskijh kompleksov* [Simulation of reconfigurable metrological complexes]. *Sbornik nauchno-metodicheskijh trudov I Vserossijskoj nauchno-praktich-*



eskoj konferencii «Aktual'nye voprosy razvitija vooruzhenija, voennoj i special'noj tehniki protivovozdushnoj i protivoraketnoj oborony, Kosmicheskijh vojsk Vozdushno-kosmicheskijh sil» [Proc. of the The collection of scientific and methodological papers I all-Russian scientific-practical conference "Topical issues of development of armaments, military and special equipment and missile defense, the Space forces, aerospace defense forces"]. 2016. Pp. 102-116. (In Russian)

6. Myshko V.V., Kravtsov A.N., Kopkin E.V., Chikurov V.A. *Teoreticheskie osnovy i metody optimizacii analiza tehniceskogo sostojanija slozhnyh sistem* [Theoretical bases and methods of optimization of technical analysis of complex systems]. Saint-Petersburg: Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, 2013. 303 p. (In Russian)

7. Petukhov G.B. Yakunin V.I. *Metodologicheskie osnovy vneshnego proektirovanija celenapravlennyh processov i celeustremlyennyh sistem* [The methodological basis for the external design of targeted processes and dedicated systems]. Moscow: AST, 2006. 504 p. (In Russian)

8. Smagin V.A., Sherstobitov S.A. Ocenivanie dlitel'nosti i kolichstva informacionnoj raboty v cikle upravljajushhej seti [Estimation of duration and amount of information in the management cycle of the network]. *Information and space*. No. 1. 2016. Pp. 75-79. (In Russian)

9. Fendrikov N.M., Yakovlev V.I. *Metody raschetov boevoj jeffektivnosti vooruzhenija* [Methods of calculation of the combat effectiveness of weapons]. Moscow: Voenizdat, 1971. 224 p. (In Russian)

10. Sherstobitov S.A. Metodika formirovanija trebovanij k sisteme kontrolja funkcionirovanija avtomatizirovannogo rabocheho mesta po poverke sredstv izmerenij [Method of forming requirements to the control system of an automated workplace functioning by instrument calibration]. *Informatics and control systems*. No. 1 (51). 2017. Pp. 95-99. (In Russian)

11. Chernov I.V. Sovershenstvovanie metodiki opredelenija azimutov s ispol'zovaniem lazernyh girokompasov [Improved methods of determining azimuths using a laser gyrocompass]. *Information and space*. No. 4. 2016. Pp. 121-126. (In Russian)

12. Kumar U.P., Somasundaram U., Kothiyal M.P., Mohan N.K. Microscopic TV Holography and Interferometry for

Surface Profiling and Vibration Amplitude Measurement in Microsystems. *Defence Science Journal*. 2011. Vol. 61. No. 5. Pp. 491-498.

13. Sign R., Nagarajan R., Poonia K., Mohan H., Mangal-hara J.P. High Temperature Calibration of Thermal Imagers for Infrared Measurements on Military Platforms. *Defence Science Journal*. 2017. Vol. 67. No. 2. Pp. 188-192.
14. Decker R., Duca M., Spickert-Fulton S. Measurement of bullet impact conditions using automated in-flight photography system. *Defence Technology*. 2017. Vol. 13. Pp. 288-294.
15. Chiribella G. Optimal networks for quantum metrology: semidefinite programs and product rules. *New Journal of Physics*. 2012. Vol. 14. 19 p.
16. Decker R., Duca M., Spickert-Fulton S. Measurement of bullet impact conditions using automated in-flight photography system. *Defence Technology*. 2017. Vol. 13. Pp. 288-294.
17. DoD automatic test systems executive directorate. DoD automatic test systems master plan. 2012. 31 p.
18. Errea S., Grigor J., King D.F., Matis G., McHugh S., McKechnie J., Nehring B. Advanced E-O Test Capability for U.S. Army Next Generation Automatic Test System. Proc. of SPIE. 2015. Vol. 9452. Pp. 1-10.
19. Knott P.A. A search algorithm for quantum state engineering and metrology. *Journal of Physics*. 2016. Vol. 18. 10 p.
20. Lazzarin A., Orsi E., Sanfilippo U. Statistical analysis on experimental calibration data for flowmeters in pressure pipes. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. Vol. 882. 10 p.
21. Milton A.F., Barone F.B., Krueer M.R. Influence of nonuniformity on infrared focal plane array performance. *Optical Engineering*. 1985. Vol. 24(5). Pp. 855-862.
22. O'Connell J. Metrology: The Creation of Universality by the Circulation of Particulars. *Social Studies of Science*. 1993. Vol. 23. Pp. 129-173.

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Gusenitsa Y.N., PhD, Lecturer of the Military Space Academy;  
 Kravtsov A.N., PhD, Docent, Head of Department of the Military Space Acade;  
 Malakhov A.V., Head Department a Branch of the Main Scientific Metrological Center of the Ministry of Defense.

---

**FOR CITATION:** Gusenitsa Y.N., Kravtsov A.N., Malakhov A.V. Method of estimation of influence of metrological support on efficiency of application of armament, military and special equipment. *H&ES Research*. 2017. Vol. 9. No. 5. Pp. 33-41. (In Russian)

# РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНЫХ УРОВНЕЙ АТМОСФЕРНЫХ РАДИОШУМОВ В ДИАПАЗОНАХ НИЗКИХ ЧАСТОТ И СРЕДНИХ ЧАСТОТ ПО ТЕРРИТОРИИ ЗЕМЛИ

**ВАРЛАМОВ**  
**Олег Витальевич**<sup>1</sup>

**ВАРЛАМОВ**  
**Владимир Олегович**<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup>к.т.н., начальник отдела Московского технического университета связи и информатики, г. Москва, Россия, [vov@mtuci.ru](mailto:vov@mtuci.ru)

<sup>2</sup>студент Московского технического университета связи и информатики, г. Москва, Россия, [f.vvo@bk.ru](mailto:f.vvo@bk.ru)

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** цифровое радиовещание; DRM; атмосферный радишум; частотно-территориальное планирование; предпочтительные частоты.

## АННОТАЦИЯ

Система цифрового радиовещания DRM, позволяющая наиболее экономично обслуживать малонаселенные и удаленные территории с отсутствующей вещательной инфраструктурой, рекомендована Международным союзом электросвязи для применения в диапазонах частот ниже 30 МГц и распоряжением Правительства признана целесообразной для использования в РФ. Особенностью цифрового радиовещания является пороговый характер приема, что требует более тщательного частотно-территориального планирования, чем в системах радиовещания с амплитудной модуляцией. Планирование сетей цифрового радиовещания в диапазонах низких частот и средних частот необходимо проводить на круглосуточной основе на годовой период с учетом сезонных факторов. Для диапазонов низких частот и средних частот особенно важным становится учет максимальных уровней атмосферных радишумов в планируемых зонах обслуживания. В сельской местности, где, как правило, проходит граница зоны обслуживания, в этих диапазонах данный вид радишумов является преобладающим над другими видами радишумов – индустриальным и галактическим. В качестве критерия «комфортного прослушивания» в системе цифрового радиовещания стандарта DRM принято корректное декодирование аудио контента в течение не менее 98% времени. Соответственно, за максимальный уровень атмосферного радишума следует принимать его значение, превышаемое в течение 2% времени в полосе сигнала цифрового радиовещания в каждой точке зоны обслуживания.

Разработана процедура перехода от описанного в рекомендации Международного союза электросвязи графоаналитического метода определения данного параметра к программно-вычислительному. Разработанный программный продукт использует модифицированный код программы Международного союза электросвязи для расчета атмосферных радишумов и позволяет отображать на карте с произвольным масштабом территориальное распределение превышаемой в течение 2% времени напряженности поля атмосферных радишумов в заданной полосе частот на частотах диапазонов низких частот и средних частот. Приведены примеры расчетов в полосе частот цифрового радиовещания 10 кГц в диапазонах низких частот – для Первого региона Международного союза электросвязи, и средних частот – для всей территории Земли. Проведенный анализ примеров расчетов позволил определить предпочтительные частоты и территории, на которых наиболее целесообразно использовать цифровое радиовещание стандарта DRM.

---

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Варламов О.В., Варламов В.О. Распределение максимальных уровней атмосферных радишумов в диапазонах низких частот и средних частот по территории Земли // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 5. С. 42-51.

## Введение

Система цифрового радиовещания DRM (ГОСТ Р 54462–2011) [1–2] рекомендована Международным союзом электросвязи (МСЭ) [3] для применения в диапазонах частот ниже 30 МГц и распоряжением Правительства признана целесообразной для использования в РФ [4]. Система DRM позволяет в диапазонах низких частот (НЧ), средних частот (СЧ) и высоких частот (ВЧ) обеспечить качество звучания, сопоставимое с качеством ультрокороткие волны частотная модуляция (УКВ-ЧМ) вещания [5]. При этом радиус зоны обслуживания передатчика, который в диапазоне очень высокие частоты (ОВЧ) ограничен расстоянием прямой видимости, составляет сотни километров. Данное обстоятельство делает стандарт DRM незаменимым для обслуживания малонаселенных удаленных территорий с отсутствующей вещательной инфраструктурой [6–8].

Разработанные в [9–13] технические решения позволяют использовать существующие антенно-мачтовые сооружения, в том числе в режиме одновременной передачи цифровой и аналоговой программ (Simulcast) в переходный период [14]. Особенности работы передающего оборудования в режиме DRM, способы построения его основных энергоемких узлов и измерительного оборудования рассмотрены в [15–12]. Требования к приемному оборудованию и решения по обеспечению требуемой чувствительности в диапазонах НЧ и СЧ разработаны в [22].

Известной особенностью цифрового радиовещания является пороговый характер приема, что требует более тщательного частотно-территориального планирования, чем в системах радиовещания с амплитудной модуляцией [23–26]. Для диапазонов НЧ и СЧ особенно важным становится учет максимальных уровней атмосферных радиозумов в планируемых зонах обслуживания. В сельской местности, где, как правило, проходит граница зоны обслуживания, в указанных диапазонах данный вид радиозумов является преобладающим над другими видами радиозумов — индустриальным и галактическим [27]. Процедура и примеры такого учета приведены в [28], где, в частности, показано, что в северных широтах РФ напряженность поля атмосферных радиозумов ниже уровня собственных шумов приемника, приведенных к напряженности поля, а в ряде тропических регионов — существенно выше.

Учитывая проводимое в настоящее время широкое внедрение системы цифрового радиовещания (ЦРВ) стандарта DRM в Индии (в 2016 году регулярное вещание в диапазоне СЧ в режиме Simulcast осуществляли 34 передатчика), проведение большого количества тестовых трансляций на всех континентах, и возрастающий интерес администраций связи различных стран к использованию этой системы, разработка инструментария для вычисления и наглядного отображения распределения максимальных

уровней атмосферных радиозумов в пределах больших территорий, в том числе по всей поверхности Земли, является актуальной.

Дополнительную актуальность данной задаче придает возможность использования результатов при планировании зон обслуживания перспективной радиосистемы диапазона СЧ «Навигационные данные» (НАВДАТ), предназначенной для использования в морской подвижной службе для цифрового радиовещания (в формате, совместимом со стандартом DRM) информации, касающейся защиты и обеспечения безопасности на море в направлении берег- судно, на частоте 500 кГц [29–30].

## Постановка задачи

В системе ЦРВ стандарта DRM в качестве критерия «комфортного прослушивания» принято корректное декодирование аудио контента в течение не менее 98% времени. Соответственно, применительно к данной системе, за максимальный уровень атмосферного радиозума принимается его значение, превышаемое в течение 2% времени [28] в полосе частот, соответствующей используемому номиналу занятия спектра: 4,5; 5; 9; 10; 18 или 20 кГц.

При проведении расчетов зон обслуживания принято использовать значение напряженности поля полезного сигнала, выраженное в дБмкВ/м. Для облегчения восприятия сопоставляемых данных, уровень атмосферного радиозума, выражаемый обычно в виде медианного значения  $F_{am}$  (в децибелах выше  $kT_0b$ ) или в единицах мощности ( $P_n = F_a + B - 204$  (дБВт), где  $B = 10 \lg b$ ,  $b$  — шумовая полоса частот), целесообразно выражать как напряженность поля радиозума, которая для короткой ( $h \ll \lambda$ ) вертикальной штыревой антенны может быть получена как [27]:

$$E_n = F_a + 20 \lg f_{\text{МГц}} + B - 95,5 \text{ (дБмкВ/м)},$$

где  $E_n$  — напряженность поля в полосе  $b$ ,  $f_{\text{МГц}}$  — центральная частота.

По значению  $V_d$  (Voltage deviation) [27] для заданной полосы частот по семейству графиков, приведенных на рис. 39 в [27], можно определить амплитуду превышения уровня шума над медианным значением ( $A_0$ ) для заданного процента времени. Зависимость  $A_0$  от  $V_d$  для рассматриваемого в настоящей работе случая превышения ординаты в течение 2% времени, полученная на основании данных из рис. 39 [27], представлена в виде точек на рис. 1. Она достаточно хорошо аппроксимируется полиномом пятого порядка (сплошная линия на рис. 1) вида:

$$A_0(V_d) = 8.921571 \cdot 10^{(-6)} \cdot x^5 - (8.151156 \cdot 10^{(-4)}) \cdot x^4 + 0.0277473 \cdot x^3 - 0.4535662 \cdot x^2 + 2.6482744 \cdot x + 3.9329623.$$

Таким образом, напряженность поля атмосферных радиозумов, превышаемая в течении 2% времени, может быть получена как:

$$E_{n2\%} = F_{am} + 20 \lg f_{MГц} + B - 95,5 + A_0(V_d) \text{ (дБмкВ/м)}.$$

Планирование сетей цифрового радиовещания в диапазонах НЧ и СЧ необходимо проводить на круглосуточной основе на годовой период с учетом сезонных факторов. В настоящее время авторам не известно ни одного широко доступного программного продукта, позволяющего рассчитывать для территорий произвольного размера максимальные ожидаемые значения напряженности поля атмосферных радиозумов (для всех сезонов года и всех временных блоков), превышаемые в течение 2% времени, и отображать их на карте.

Так, свободно распространяемая МСЭ программа NOISBW позволяет для выбранной точки с заданными географическими координатами рассчитать ожидаемые медианные значения атмосферного радиозума  $F_{am}$  (в децибелах выше  $kT_0b$ ) и значение  $V_d$  (Voltage deviation) [27] в заданной полосе на используемой частоте для четырех сезонов года с шестью временными блоками в каждом. Эта программа была написана на языке FORTRAN V в 1993 году (автор Gregory R. Hand) как 16-ти битное DOS-приложение для работы в диалоговом режиме и не работоспособна на современных компьютерах с 64-х битной операционной системой. Вывод результатов расчетов осуществляется в текстовый файл. Выбор максимальных значений можно проводить только в ручном режиме по данным выходного текстового

файла, а построение карты местности с использованием данной программы не представляется возможным.

Более современная программа того же автора, GH\_NOISE, написана в 2007 году как Windows приложение на Salford FTN95 [31]. Ориентированная, преимущественно, на диапазон ВЧ, она позволяет рассчитывать значение  $F_{am}$  в полосе 1 Гц на используемой частоте для четырех сезонов года с шестью временными блоками в каждом от атмосферного, промышленного и галактического шума, а также их комбинаций, и отображать результаты в графическом виде на карте мира. Следует отметить, что используемый в программе GH\_NOISE модуль отображения результатов расчетов на карте мира представляет собой усеченный вариант (без возможности построения карты отдельных регионов) программы отображения WORLDWIN, использовавшейся в свободно распространяемом пакете ITS HF Propagation того же автора [31].

Таким образом, для решения рассматриваемой задачи может быть использована следующая стратегия.

1. Модификация кода программы NOISBW, заключающаяся в:

- добавлении блока выбора максимальных значений  $F_{am}$  по всем сезонам и частотно-временным блокам для одной географической точки;
- пересчет значений  $F_{am}$  в напряженность поля в заданной полосе частот, превышаемую в течение 2% времени, по значениям  $V_d$  с учетом полученной выше зависимости  $A_0$  от  $V_d$ ;
- организации проведения серии расчетов в пределах заданного поля географических координат с требуемым шагом;

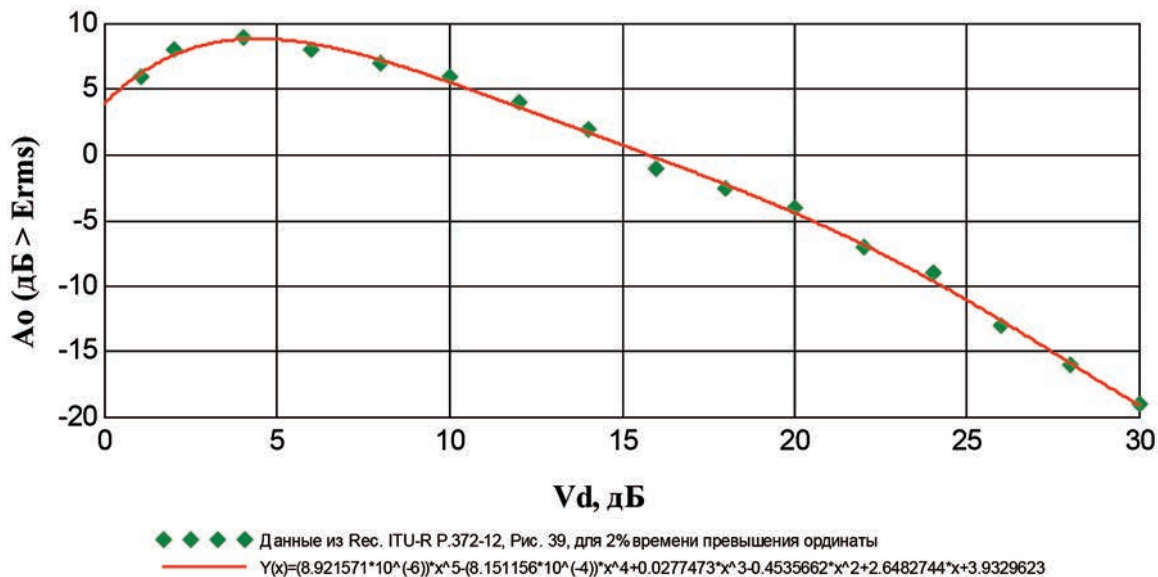


Рис. 1. Зависимость амплитуды превышения уровня шума над медианным значением ( $A_0$ ) от  $V_d$  для 2% времени превышения ординаты

- организации ее работы в качестве вызываемой программы с полным набором входных параметров, определяемых файлом входных данных;

- генерации выходного файла в формате, пригодном для чтения программой построителя карты WORLDWIN;

- перекомпилирование в современной среде разработки для обеспечения возможности работы с 64-х битными операционными системами.

2. Написание управляющей программы с графическим интерфейсом пользователя, позволяющем:

- вводить координаты для границ географической области, в которой проводятся расчеты;

- задавать центральную частоту и полосу частот;

- вызывать модифицированную версию программы NOISBW и передавать ей исходные данные для расчета;

- формировать файлы конфигурации для программы построителя карты WORLDWIN и осуществлять ее запуск с требуемыми параметрами;

- проводить расчет с использованием модифицированной версии программы NOISBW для одиночной точки по сезонам года и временным блокам с построением графиков для удобства визуального восприятия.

## Реализация программного продукта и примеры использования

При реализации программного продукта были решены все поставленные выше задачи. Управляющая программа NBWMax.exe (Noise BandWidth Maximum) была реализована в среде разработки Microsoft Visual Studio 2010 на языке программирования C#. Интерфейс пользователя управляющей программы приведен на рис. 2.

Размер рассчитываемой сетки по координатам может изменяться от 5x5 точек до 361x361 точек по широте

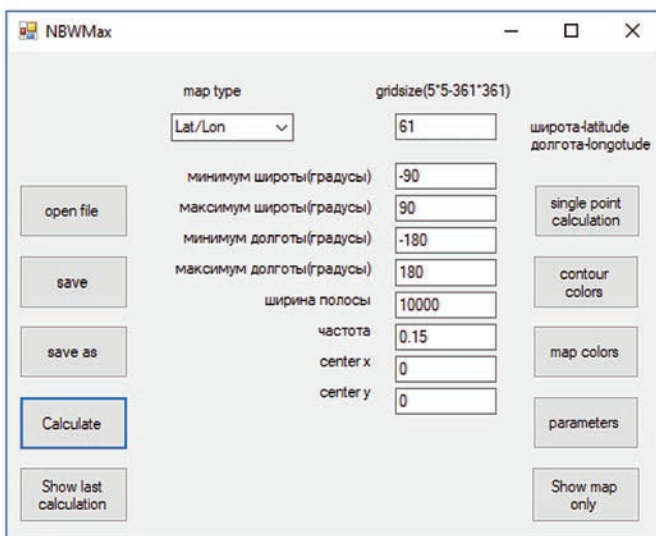


Рис. 2. Интерфейс пользователя управляющей программы

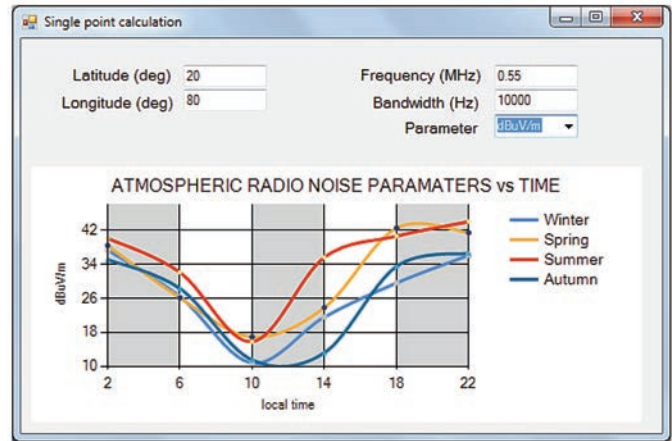


Рис. 3. Пример выходных данных расчета для одиночной точки

и долготе. По умолчанию используется 61x61 точка. При этом при расчете шумов по всему миру шаг по широте составляет 3 градуса, а по долготе 6 градусов, что аналогично программе GH\_NOISE. При уменьшении размеров территории, для которой проводится расчет, шаг пропорционально уменьшается.

Пример отображения выходных данных при расчете для одиночной точки по сезонам года и временным блокам показан на рис. 3.

Примеры расчетов превышаемой в течение 2% времени напряженности поля атмосферных радиозумов в полосе частот ЦРВ 10 кГц в диапазонах НЧ (для Первого региона МСЭ — на частотах 0,15; 0,20; 0,25 МГц) и СЧ (для всей территории Земли — на частотах 0,55; 1,0; 1,5 МГц) приведены на рис. 4 и 5 соответственно.

## Анализ результатов

**Диапазон НЧ.** Фрагмент диапазона НЧ (148,5–283,5 кГц) выделен для радиовещания в Первом регионе МСЭ, который включает в себя Европу, Африку, страны бывшего СССР и ближнего Востока, а также Монголию. Минимально используемая напряженность поля сигнала ЦРВ для этого диапазона определена в [23] как 46 дБмкВ/м в режиме помехоустойчивости А, 9 кГц, 64QAM-1, с требуемым для декодирования ОСШ, равным 16 дБ. Данное значение соответствует уровню собственного шума приемника, приведенного к напряженности поля, равному 30 дБмкВ/м. При превышении этой величины атмосферными радиозумами чувствительность приемника не будет полностью использована, и необходимая напряженность поля будет определяться как уровень атмосферных радиозумов плюс требуемое для декодирования значение ОСШ. Это, в свою очередь, потребует увеличения мощности передатчика для сохранения радиуса зоны обслуживания, или приведет к уменьшению зоны обслуживания при сохранении мощности передатчика.

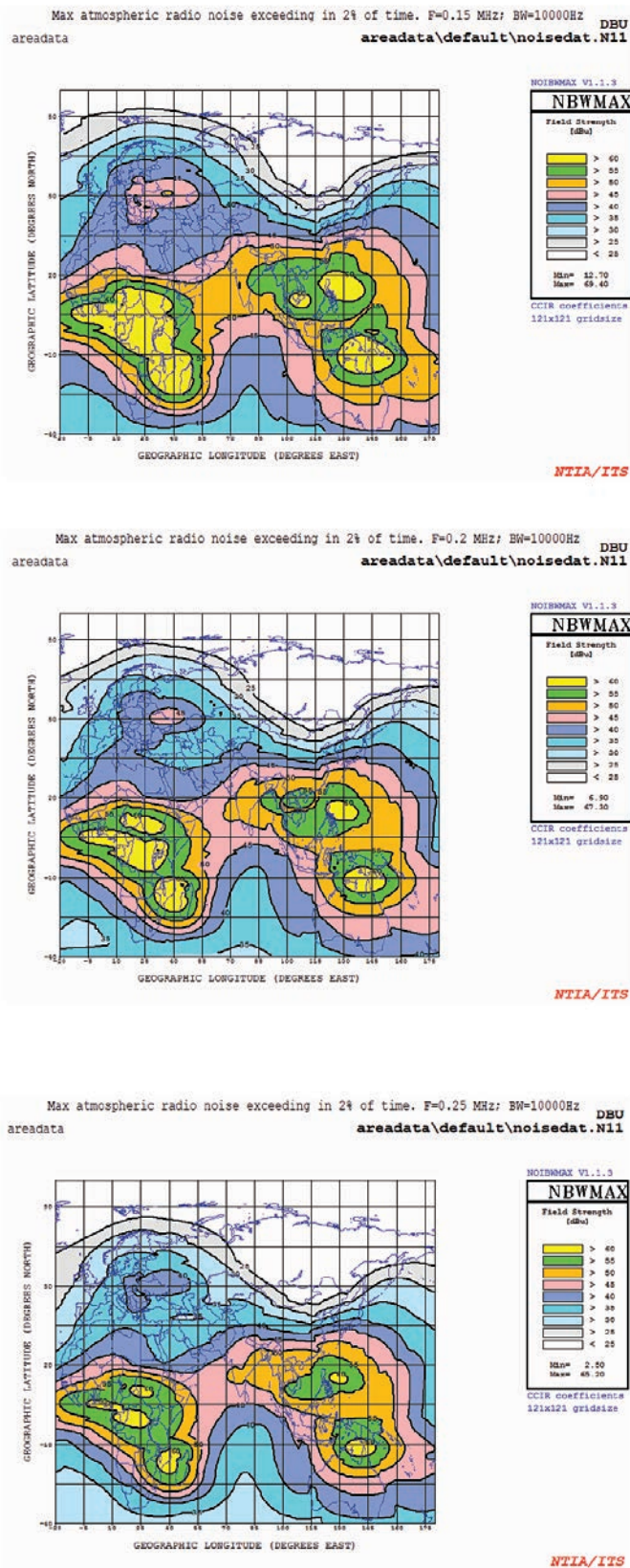


Рис. 4. Примеры расчетов в диапазоне НЧ для Первого региона МСЭ на частотах 0,15; 0,20; 0,25 МГц

Как видно из рис. 4, на большей части азиатской территории РФ уровень атмосферных ради шумов не превышает собственных шумов приемника, что позволяет наиболее экономичным способом обслуживать цифровым радиовещанием малонаселенные и удаленные территории, используя самые низкие частоты диапазона НЧ. Незначительное превышение (на 5–10 дБ на частоте 150 кГц) наблюдается в северной части Скандинавского полуострова, Великобритании, северо-западной части Франции, Португалии и восточной части Казахстана. На этих территориях целесообразнее использовать верхнюю половину диапазона НЧ, где превышение атмосферных ради шумов над шумами приемника составляет не более 5 дБ.

Верхнюю треть диапазона НЧ можно также использовать в северной части и на южной оконечности Африки, на ближнем Востоке, в западной Европе и в центральной части РФ, где превышение атмосферных ради шумов над шумами приемника составляет до 10 дБ.

Использование ЦРВ в диапазоне НЧ в экваториальной и тропической частях Африки, где находится один из трех мировых очагов грозовой активности и связанных с ним атмосферных радиопомех, напряженность поля которых даже на верхних частотах диапазона НЧ превышает 55–60 дБмкВ/м, представляется мало целесообразным.

**Диапазон СЧ.** Участок диапазона СЧ (526,5–1606,5 кГц), выделен для радиовещания на всемирной основе. Минимально используемая напряженность поля сигнала ЦРВ для этого диапазона определена в [23] как 40 дБмкВ/м в режиме помехоустойчивости А, 9 кГц, 64QAM-1, с требуемым для декодирования ОСШ, равным 16 дБ. Данное значение соответствует уровню собственного шума приемника, приведенного к напряженности поля, равному 24 дБмкВ/м.

Как видно из рис. 5, в трех мировых очагах грозовой активности даже на верхних частотах диапазона СЧ напряженность поля атмосферных ради шумов превышает 45 дБмкВ/м. Это потребует минимально используемой напряженности поля не менее 60 дБмкВ/м, что нивелирует энергетический выигрыш системы ЦРВ по сравнению с радиовещанием с амплитудной модуляцией. Однако выигрыш системы ЦРВ в качественных характеристиках, как по качеству передаваемого аудио контента, так и по возможностям передачи многопрограммного вещания и дополнительной цифровой информации, остается. По этой причине целесообразность использования ЦРВ в диапазоне СЧ в этих регионах следует оставить на усмотрение администраций связи соответствующих стран.

В целом, ориентируясь только на уровень атмосферных ради шумов, благоприятными для применения ЦРВ во всем диапазоне СЧ можно считать территории, расположенные выше 30 °СШ и ниже 30° ЮШ, за исключением центральной части Северной Америки, где целесообразнее использовать верхнюю половину диапазона СЧ. Для

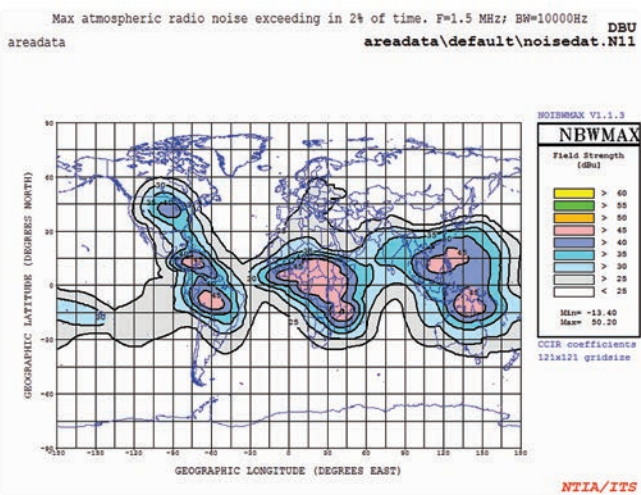
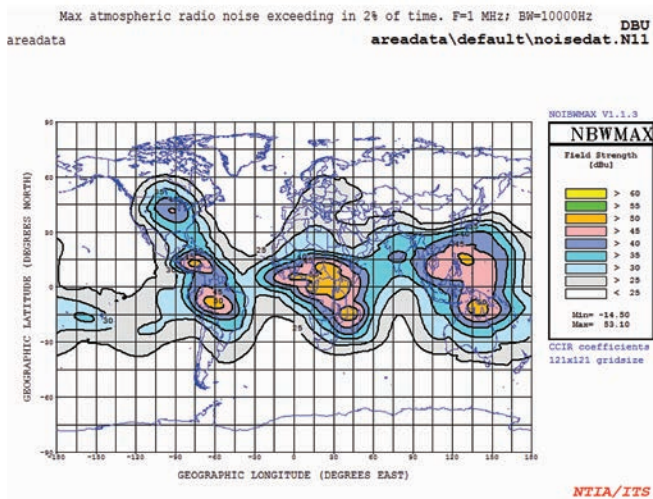
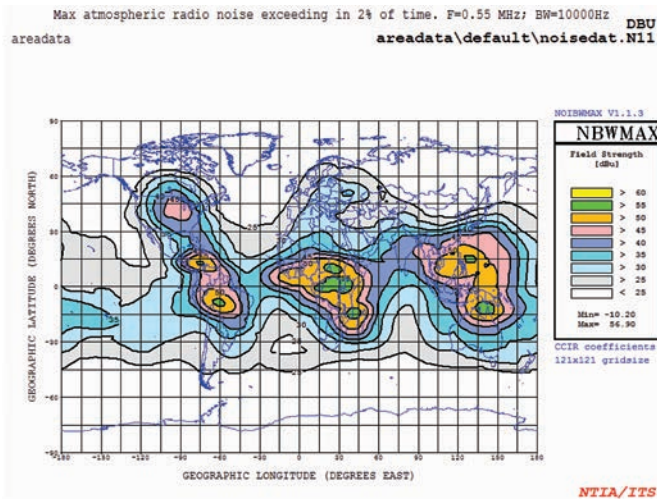


Рис. 5. Примеры расчетов в диапазоне СЧ для всей территории Земли на частотах 0,55; 1,0; 1,5 МГц

более точного анализа необходимо учитывать сезонные вариации напряженности поля полезного сигнала, которые в диапазоне СЧ существенно выше, чем в диапазоне НЧ, и зависят от климатических условий, а также распределение напряженности поля от места к месту [34].

### Заключение

Разработанные методика расчетов и программный продукт позволяют определять максимальные ожидаемые значения напряженности поля атмосферных радиозумов, превышаемые в течении 2% времени в диапазонах НЧ и СЧ в заданной полосе частот как по всей территории Земли, так и в локальных географических регионах, и отображать их на карте.

Проведенный анализ примеров расчетов позволил определить предпочтительные частоты и территории, на которых наиболее целесообразно использовать цифровое радиовещание стандарта DRM.

Более подробные расчеты для территорий конкретных стран на заданных частотах, которые необходимо проводить при планировании тестового или регулярного вещания, могут быть выполнены по заказу заинтересованных администраций связи или вещателей.

Дальнейшими направлениями работы могут являться актуальная для крупных городов разработка процедуры совместного учета атмосферных и промышленных радиозумов, имеющих различное распределение, а также разработка программного обеспечения для расчетов зон покрытия передатчиков ЦРВ стандарта DRM диапазонов НЧ и СЧ с учетом неравномерного распределения уровня радиозумов в пределах зоны обслуживания. Данная задача особенно актуальна для автоматизации расчетов зон покрытия в крупно-кластерных одночастотных сетях ЦРВ, описанных в [6, 32–33], поскольку в пределах кластера с размерами, превышающими две тысячи километров, уровень шума может изменяться более чем на 10 дБ.

### Литература

1. ETSI ES201 980 V4.1.1 (2014–01) Digital Radio Mondiale (DRM); System Specification.
2. Варламов О. В. Разработка отечественной нормативной базы цифрового радиовещания стандарта DRM // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2013. Т. 7. № 9. С. 47–50.
3. Rec. ITU-R BS.1514–2 (03/2011). System for digital sound broadcasting in the broadcasting bands below 30 MHz. Geneva. 2011.
4. Распоряжение Правительства РФ от 28 марта 2010 г. № 445-р.
5. Варламов О. В. Качественные характеристики звукового тракта в системе DRM // Век качества. 2014. № 1. С. 48–52.

6. *Варламов О. В.* Способ организации глобальной сети цифрового радиовещания в диапазоне ДВ // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. № 5. С. 63–68.
7. *Варламов О. В.* Исследование цифрового радиовещания DRM в диапазоне СВ в зоне фединга // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Т. 9. № 2. С. 41–45.
8. *Варламов О. В.* Использование необыкновенной волны для цифрового радиовещания DRM зенитным излучением // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. № 1. С. 32–38.
9. *Варламов О. В., Горегляд В. Д.* Расширение полосы согласования передающих вещательных антенных систем диапазона ДВ для работы в режиме DRM // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2013. № 1. С. 18–22.
10. *Варламов О. В.* Разработка алгоритма и программных средств проектирования антенно-согласующих цепей цифровых радиовещательных передатчиков стандарта DRM // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2013. № 2. С. 47–50.
11. *Гайнутдинов Т. А., Гаранкина Н. И., Кочержевский В. Г.* Исследование способов модернизации действующей передающей радиовещательной антенны АМПП для работы в стандарте DRM // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2013. Т. 7. № 9. С. 51–56.
12. *Гайнутдинов Т. А., Гаранкина Н. И., Кочержевский В. Г., Гусева А. С.* Простые широкополосные согласующие устройства длинноволновых радиовещательных антенн // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2014. Т. 8. № 11. С. 33–39.
13. *Гайнутдинов Т. А., Гаранкина Н. И., Кочержевский В. Г.* Двухзвенное согласующее устройство длинноволновых радиовещательных антенн // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Т. 9. № 6. С. 48–56.
14. *Varlatomov O. V.* Analog to digital signal power ratio in simulcast DRM transmission // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2016. Т. 10. № 12. С. 81–84.
15. *Варламов О. В.* Research of influence of DRM broadcast transmitter nonlinearities onto the output signal parameters // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2014. № 2. С. 59–60.
16. *Варламов О. В., Громорушкин В. Н., Лаврушенков В. Г.* Разработка коротковолнового ключевого усилителя мощности с разделным усилением составляющих однополосного сигнала // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2011. Т. 5. № 9. С. 42–44.
17. *Варламов О. В., Гончаров И. А., Лаврушенков В. Г.* Мощный ВЧ цифроаналоговый преобразователь для усилителя мощности ОМ сигналов // Электросвязь. 1989. № 8. С. 54–57.
18. *Варламов О. В.* Разработка высокоэффективного модуляционного тракта для ВЧ усилителя мощности с разделным усилением составляющих однополосного сигнала // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2011. № 9. С. 45–46.
19. *Варламов О. В., Громорушкин В. Н., Лаврушенков В. Г., Чугунов И. В.* Генератор испытательных сигналов для измерительных характеристик ключевых усилителей мощности с разделным усилением составляющих однополосного сигнала // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2011. № 9. С. 47–49.
20. *Варламов О. В., Лаврушенков В. Г.* Критерии качества передающего устройства для стандарта DRM и измерительное оборудование // Broadcasting. Телевидение и радиовещание. 2004. № 3. С. 44–48.
21. *Иванюшкин Р. Ю., Варламов О. В., Сягаев А. К.* Нелинейные искажения сигнала стандарта DRM в синтетических схемах линейного усиления // В сборнике: Обработка сигналов в системах наземной радиосвязи и оповещения. Материалы XV межрегиональной научно-технической конференции. 2007. С. 301–310.
22. *Варламов О. В.* Разработка требований к приемному оборудованию сетей цифрового радиовещания стандарта DRM // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2013. № 9. С. 39–42.
23. Rec. ITU-R BS.1615-1 (05/2011). “Planning parameters” for digital sound broadcasting at frequencies below 30 MHz. Geneva. 2011.
24. *Варламов О. В.* Особенности частотно-территориального планирования сетей радиовещания DRM диапазонов НЧ и СЧ // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2013. № 9. С. 43–46.
25. *Варламов О. В.* Корректное планирование сетей DRM вещания // Электросвязь. 2014. № 6. С. 26–34.
26. *Варламов О., Лаврушенков В., Козыревский Б., Калюга В.* Уточнение отдельных величин защитных отношений для цифрового радиовещания стандарту DRM. Результаты лабораторных и эфирных измерений // Broadcasting. Телевидение и радиовещание. 2006. № 5. С. 56–59.
27. Rec. ITU-R P. 372-13 (09/2016). Radio noise. Geneva. 2016.
28. *Varlatomov O.* The radio noise effect on the coverage area of DRM broadcast transmitter in different regions // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Т. 9. № 2. С. 90–93.
29. Рек. МСЭ-R M.2010 (03/2012) «Характеристики цифровой системы под названием «Навигационные данные», которая предназначена для радиовещания информации, касающейся защиты и обеспечения безопасности на море в направлении берег-судно в диапазоне 500 кГц». Geneva. 2012.
30. *Варламов О. В.* Применение стандарта DRM для передачи навигационных данных в направлении берег — судно // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2016. Т. 7. № 2. С. 15–16.
31. Интернет ресурс: [www.greg-hand.com/hf.html](http://www.greg-hand.com/hf.html) (дата обращения 17.07.2017).



32. Варламов О.В. Об организации общегосударственной сети цифрового радиовещания в диапазоне ДВ // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. 2014. Т. 4. № 1. С. 16–19.

33. Варламов О.В. Применение крупно-кластерных синхронных зон диапазона ДВ для организации сетей DRM

вещания на территориях стран РСС // Технологии информационного общества X Международная отраслевая научно-техническая конференция: Сб. трудов. 2016. С. 89–90.

34. Rec. ITU-R P. 1321–5 (07/2015). Propagation factors affecting systems using digital modulation techniques at LF and MF. Geneva. 2015.

---

## DISTRIBUTION OF MAXIMUM LEVELS OF ATMOSPHERIC RADIO NOISE IN LF AND MF RANGES IN THE TERRITORY OF THE EARTH

**OLEG V. VARLAMOV,**  
Moscow, Russia, vov@mtuci.ru

**VLADIMIR O. VARLAMOV,**  
Moscow, Russia, f.vvo@bk.ru

**KEYWORDS:** digital broadcasting; DRM; atmospheric radio noise; regional frequency planning; preferred frequencies

### ABSTRACT

The DRM digital broadcasting system allows the most economical servicing of sparsely populated and remote areas with a missing broadcast infrastructure. It is recommended by the ITU for use in frequency bands below 30 MHz and by the government order is deemed expedient for use in the Russian Federation.

A feature of digital broadcasting is the threshold reception. This requires more careful regional frequency planning than broadcasting systems with amplitude modulation.

Networks of digital broadcasting in the LF and MF bands should be planned for round-the-clock broadcasting throughout the year, taking into account seasonal factors. For the LF and MF bands, is especially important to take into account the maximum levels of atmospheric radio noise in the planned service areas. In rural areas, where, usually, passes the border of the service area, in these bands this type of radio noise is predominant over other types of radio noise – industrial and galactic. As a criterion of "comfortable listening" in the DRM system, correct decoding of audio content for at least 98% of the time is accepted. Accordingly, the maximum level of atmospheric radio noise should be taken as

its value, exceeded within 2% of the time in the band of the DRM signal at each point of the service area. Was developed a procedure for transition from the graph-analytical method described in the ITU recommendation to the definition of this parameter to the software-computing one. Developed software product uses the modified code of the ITU program for calculating atmospheric radio noise and allows mapping with an arbitrary scale the distribution over the area of the field strength of atmospheric radio noise exceeded for 2% in a given bandwidth at the frequencies of the LF and MF bands. Examples of calculations are given in the 10 kHz DRM bandwidth in the LF bands – for the First ITU region, and MF – for the entire territory of the Earth. The analysis of the examples of calculations made it possible to determine the preferred frequencies and areas on which it is most expedient to use digital broadcasting of the DRM standard.

### REFERENCES

1. ETSI ES201980 V4.1.1 (2014-01) Digital Radio Mondiale (DRM); System Specification.
2. Varlamov O.V. Development of national regulatory frame-

- work for DRM digital broadcasting. *T-Comm*. 2013. No. 9. Pp. 47-50. (In Russian)
3. Rec. ITU-R BS.1514-2 (03/2011). System for digital sound broadcasting in the broadcasting bands below 30 MHz. Geneva. 2011.
4. Order of the Government of the Russian Federation of March 28. 2010. No. 445-r
5. Varlamov O.V. Kachestvennye karakteristiki zvukovogo trakta v sisteme DRM [Qualitative characteristics of the sound path in the system DRM]. *Vek kachestva* [Age of quality]. 2014. No. 1. Pp. 48-52. (In Russian)
6. Varlamov O.V. Method of organization global digital radio broadcasting network in the LW band. *T-Comm*. 2015. Vol. 9. No.5. Pp. 63-68. (In Russian)
7. Varlamov O.V. Study of DRM digital broadcasting in the MF fading zone. *T-Comm*. 2015. No.2. Pp. 41-45. (In Russian)
8. Varlamov O.V. Using the extraordinary wave for digital DRM NVIS broadcasting. *T-Comm*. 2015. No.1. Pp. 32-38. (In Russian)
9. Varlamov O.V., Goreglyad V.D. Bandwidth extension LW transmitting broadcasting antenna systems for operating in DRM mode. *T-Comm*. 2013. No. 1. Pp. 18-22. (In Russian)
10. Varlamov O.V. Development of algorithm and software tools for antenna matching circuit design of DRM digital broadcast transmitters. *T-Comm*. 2013. No. 2. Pp. 47-50. (In Russian)
11. Gainutdinov T.A., Garankina N.I., Kocherzhewskiy V.G. The research of ways of modernization AMSHC for work in DRM standard. *T-Comm*. 2013. No 9. Pp. 51-57. (In Russian)
12. Gajnutdinov T.A., Garankina N.I., Kocherzhewskij V.G., Guseva A.S. The simple wideband matching schemes for long wave broadcasting antennas. *T-Comm*. 2014. No. 11. Pp. 33-39. (In Russian)
13. Gainutdinov T.A., Garankina N.I., Kocherzhewski V.G. Two-unit matching device of the long-wave broadcasting antennas. *T-Comm*. 2015. Vol. 9. No. 6. Pp. 48-56. (In Russian)
14. Varlamov O.V. Analog to digital signal power ratio in simulcast DRM transmission. *T-Comm*. 2016. Vol. 10. No. 12. Pp. 81-84.
15. Varlamov O.V. Research of influence of DRM broadcast transmitter nonlinearities onto the output signal parameters. *T-Comm*. 2014. No. 2. Pp. 59-60.
16. Varlamov O.V., Gromorushkin V.N., Lavrushenkov V.G. Development of switching shortwave power amplifier with separate gain of component of single-sideband signal. *T-Comm*. 2011, No. 9. Pp. 42-44. (In Russian)
17. Varlamov O.V., Goncharov I.A., Lavrushenkov V.G. Moshhnyj VCh cifroanalogovyy preobrazovatel' dlja usilitelja moshhnosti OM signalov [High-power HF digital-analog converter for SSB signal power amplifiers]. *Jelektrosvjaz'* [Telecommunications]. 1989. No. 8. Pp. 54-57. (In Russian)
18. Varlamov O.V. Development of high efficiency modulation path for RF power amplifier with separate gain component of single-sideband signal. *T-Comm*. 2011. No. 9. Pp. 45-46. (In Russian)
19. Varlamov O.V., Gromorushkin V.N., Lavrushenkov V.G., Chugunov I.V. Generator of test signals for measuring characteristics of EER SSB switching power amplifiers. *T-Comm*. 2011. No. 9. Pp. 47-49. (In Russian)
20. Varlamov O.V., Lavrushenkov V.G. Kriterii kachestva peredajushhego ustrojstva dlja standarta DRM i izmeritel'noe oborudovanie [The quality criteria for the DRM standard transmitting device and the measuring equipment]. *Broadcasting. Televidenie i radioveshhanie*. [Broadcasting. Television and radio broadcasting]. 2004. No. 3. Pp. 44-48. (In Russian)
21. Ivanjushkin R. Ju., Varlamov O.V., Sjagaev A.K. Nelinejnye iskazhenija signala standarta DRM v sinteticheskikh shemah linejnogo usilenija [Non-linear distortion in the DRM standard synthetic linear amplification circuits] *Obrabotka signalov v sistemah nazemnoj radiosvjazi i opoveshhenija: Sbornik materialov XV mezhregional'noj nauchno-tehnicheskoy konferencii* [The collection of reports of XV-th International scientific-technical conference "Processing signals terrestrial radio systems and alarm systems"]. Moscow: NTORES. 2007. Pp. 301-310. (In Russian)
22. Varlamov O.V. Development of requirements for receiving equipment of digital broadcasting networks of the DRM standard. *T-Comm*. 2013. No. 9. Pp. 39-42. (In Russian)
23. Rec. ITU-R BS.1615-1 (05/2011). "Planning parameters" for digital sound broadcasting at frequencies below 30 MHz. Geneva. 2011.
24. Varlamov O.V. Peculiarity of frequency-territorial planning of DRM broadcasting networks for LW and MW bands. *T-Comm*. 2013. No. 9. Pp. 43-46. (In Russian)
25. Varlamov O.V. Korrektnoe planirovanie setej DRM veshhanija [Correctly planning of DRM broadcasting networks]. *Jelektrosvjaz'* [Telecommunications]. 2014. No. 6. Pp. 26-34. (In Russian)
26. Varlamov O., Lavrushenkov V., Kozyrevskij B., Kaljuga V. Utochnenie ot del'nyh velichin zashhitnyh otnoshenij dlja cifrovogo radioveshhanija standartu DRM. Rezul'taty laboratornyh i jefirnyh izmerenij [Refinement of individual values of protection ratios for digital broadcasting to the DRM standard. Results of laboratory and field measurements]. *Broadcasting. Televidenie i radioveshhanie* [Broadcasting. Television and radio broadcasting]. 2006. No. 5. Pp. 56-59. (In Russian)
27. Rec. ITU-R P. 372-13 (09/2016). Radio noise. Geneva. 2016.
28. Varlamov O.V. The radio noise effect on the coverage area of DRM broadcast transmitter in different regions. *T-Comm*. 2015. Vol. 9. No. 2. Pp. 90-93.
29. Rec. ITU-R M.2010 (03/2012). Characteristics of a digital system, named Navigational Data for broadcasting maritime safety and security related information from shore-to-ship in the 500 kHz band. Geneva. 2012.

30. Varlamov O.V. Primenenie standarta DRM dlja peredachi navigacionnyh dannyh v napravlenii bereg – sudno [Application of the DRM standard for the transfer of navigational data in the direction of the shore-ship]. *Sistemy sinhronizacii, formirovanija i obrabotki signalov* [Systems of signal synchronization, generating and processing]. 2016. Vol. 7. No. 2. Pp. 15-16. (In Russian)
31. [www.greg-hand.com/hf.html](http://www.greg-hand.com/hf.html) Date of reference 17.07.2017.
32. Varlamov O.V. Ob organizacii obshhegosudarstvennoj seti cifrovogo radioveshhanija v diapazone DV [On the organization of a nationwide digital broadcasting network in the LW range]. *REDS: Telekommunikacionnye ustrojstva i sistemy* [REDS: Telecommunication devices and systems]. 2014. Vol. 4. No. 1. Pp. 16-19. (In Russian)
33. Varlamov O.V. Primenenie krupno-klasternyh sinhronnyh zon diapazona DV dlja organizacii setej DRM veshhanija na territorijah stran RSS [The use of large-cluster synchronous

zones of the LW band for the organization of DRM broadcasting networks in the territories of the RCC countries] *Tehnologii informacionnogo obshhestva: Sbornik dokladov X Mezhdunarodnoi otraslevoi nauchno-tehnicheskoi konferencii* [The collection of reports of Xth International Branch Scientific and Technical Conference "Information Society Technologies"] Moscow: Media Publisher. 2016. Pp. 89-90. (In Russian)

34. Rec. ITU-R P. 1321-5 (07/2015). Propagation factors affecting systems using digital modulation techniques at LF and MF. Geneva. 2015.

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Varlamov O.V., PhD, Head of Department of the Moscow Technical University of Communications and Informatics.

Varlamov V.O., Student of the Moscow technical university of communications and informatics.

---

**FOR CITATION:** Varlamov O.V., Varlamov V.O. Distribution of maximum levels of atmospheric radio noise in LF and MF ranges in the territory of the Earth. *H&ES Research*. 2017. Vol. 9. No. 5. Pp. 42-51. (In Russian)



# ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА С ПОМОЩЬЮ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**МАРТЫНОВА**

**Любовь Александровна<sup>1</sup>**

**ГРИНЕНКОВ**

**Алексей Владимирович<sup>2</sup>**

**ПРОНИН**

**Андрей Орионович<sup>3</sup>**

**КУЛИКОВСКИХ**

**Юлия Валентиновна<sup>4</sup>**

---

<sup>1</sup>д.т.н., старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник АО «Концерн "ЦНИИ "Электроприбор"», г. Санкт-Петербург, Россия, martynowa999@bk.ru

<sup>2</sup>начальник отдела АО «Концерн "ЦНИИ "Электроприбор"», г. Санкт-Петербург, Россия, grin\_a\_v@mail.ru

<sup>3</sup>начальник группы АО «Концерн "ЦНИИ Электроприбор"», Санкт-Петербург, Россия, pronin.a.o@gmail.com

<sup>4</sup>к.т.н., научный сотрудник АО «Концерн "ЦНИИ Электроприбор"», г. Санкт-Петербург, Россия, y\_shafranyuk@mail.ru

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** автономный необитаемый подводный аппарат; система управления; мультиагентная технология; информационный обмен; надежность канала связи.

## АННОТАЦИЯ

Рассматривается автономный необитаемый подводный аппарат, представляющий собой сложный технический комплекс морской среды обитания, который ввиду полной своей автономности должен принимать решения в полностью автоматическом режиме. При реализации наиболее перспективного подхода к построению системы управления – мультиагентного, одной из задач, требующей своего решения, является задача выбора параметров обмена информацией между подсистемами-агентами.

В работе решается задача определения рациональных параметров обмена информацией между подсистемами-агентами в мультиагентной системе управления. Параметрами, влияние которых оценивалось, являлись: временной интервал между отправлением сообщений и количество одновременно отправляемых различных сообщений разным адресатам. Обмен информацией осуществлялся путем передачи пакетов сообщений между подсистемами-агентами, содержащих данные, команды, запросы, ответы. Выбор параметров обмена информацией осуществлялся на основе оценки надежности каналов передачи данных между подсистемами – агентами.

Для проведения исследований была разработана имитационная модель функционирования мультиагентной системы управления. При проведении исследований рассматривался тактический эпизод, связанный с движением подводного аппарата при входе в узкость, а затем – при обходе возникшего препятствия, и два сценария функционирования мультиагентной системы управления: первый – обработка полученного задания, и второй - обработка информации в процессе движение подводного аппарата по заданному маршруту.

По результатам проведенных численных экспериментов позволили определить наиболее рациональные значения параметров обмена информацией между подсистемами-агентами в процессе функционирования мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата.

---

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мартынова Л.А., Гриненков А.В., Пронин А.О., Куликовских Ю.В. Исследование функционирования мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата с помощью имитационного моделирования // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 5. С. 52-65.

## Введение

Автономные обитаемые подводные аппараты (АНПА) являются перспективным средством изучения и освоения океана [1–9]. Они предназначены для решения таких задач, как:

- прокладка подводных кабелей;
- обследование подводных трубопроводов
- проведение подводных научных исследований в различных областях
- поиск подводных месторождений
- поиск донных объектов (мин, затонувших кораблей и самолетов) в назначенном районе относительно большой площади;
- нейтрализация подводного нарушителя, вошедшего в охраняемый район.

Поэтому современные АНПА представляют собой достаточно сложную систему, сопоставимую по выполняемому функционалу с обитаемыми подводными аппаратами. Однако, в отличие от обитаемых подводных аппаратов, принятие решений в системе управления (СУ) АНПА должно осуществляться автономно в полностью автоматическом режиме.

Для обеспечения возможности разрабатываемыми и проектируемыми АНПА решения перечисленных задач необходим тщательный подход к его разработке.

Наиболее важными задачами, которые необходимо решить на стадии разработки АНПА, являются:

- сравнительная оценка вариантов конструкции АНПА;
- сравнительная оценка вариантов построения системы управления АНПА и её элементов;
- оценка надежности канала передачи данных.

Для решения этих задач необходим учет принципиальных особенностей АНПА, отличающих АНПА от других средств освоения океана:

- АНПА является автономным безэкипажным средством, предназначенным для функционирования в автоматическом режиме, решая задачи, соизмеримые по сложности с задачами, решаемыми экипажными средствами;
- ограниченные размеры АНПА накладывают жесткие ограничения на массогабаритные характеристики размещаемой на АНПА аппаратуры (в том числе на размеры и массу гидроакустических антенн) и, как следствие, на производительность вычислительных средств;
- функционирование АНПА осуществляется в условиях жестких физических ограничений:
  - по точности автономной подводной навигации;
  - по дальности и скорости звукоподводной связи с взаимодействующими силами;
  - по энергопотреблению.

Вся нагрузка по автоматизированному принятию решения ложится на СУ АНПА, в связи с чем возникает задача построения его эффективной СУ. В связи с необходимостью

решения АНПА большого количества разнообразных задач в процессе выполнения задания, именуемого миссией, его система управления должна быть основана на современных достижениях в области технологий управления, наиболее перспективной из которых является мультиагентная технология [10–13]. Мультиагентная технология отличается от многообъектовой и мультикомпонентной технологий — децентрализацией СУ с делегированием ряда функций по управлению интеллектуальным элементам системы, называемым агентами. Одной из задач при использовании мультиагентной технологии является задача надежности канала обмена информацией между подсистемами — агентами.

Дело в том, что управление каждой подсистемой СУ осуществляется с использованием самостоятельной программы. Информация обмена между программами-агентами содержит:

- данные о текущих параметрах, выдаваемых исполнительской аппаратурой;
- команды на изменение параметров и переключение из режима в режим;
- запросы на получение интересующих параметров для принятия решения;
- ответы на поступившие запросы.

Поскольку агенты отправляют сообщения независимо друг от друга, то возникают ситуации переполнения каналов обмена сообщениями, недостаток временных ресурсов для обеспечения функционирования СУ АНПА в режиме реального времени. В связи с этим возникает задача оптимизации параметров обмена информацией между агентами таким образом, чтобы канал передачи данных был надежным. Таким образом, одной из задач является задача определения параметров канал передачи данных.

Применение современных технологий к объектам морской среды обитания перед проведением натурных испытаний требует предварительной проработки технических решений с использованием математического моделирования [14]. Поэтому использование мультиагентной технологии при построении СУ автономного обитаемого подводного аппарата (АНПА) необходимо предварительно протестировать с помощью имитационного моделирования.

Основными задачами, которые возможно решить с использованием имитационного моделирования мультиагентной системы управления АНПА, являются:

- тестирование алгоритмов функционирования каждой подсистемы СУ АНПА;
- тестирование алгоритмов взаимодействия подсистем — агентов между собой;
- определение объема информации, которой должны обмениваться подсистемы-агенты между собой в ходе своего функционирования;
- определение параметров взаимодействия подсистем-агентов между собой.

Ранее разрабатываемые имитационные модели для подобных систем отличались тем, что в основе своей имели единый программный файл с использованием централизованных алгоритмов с последовательным моделированием процессов в одной программе. Такой подход был оправдан при моделировании централизованного принципа управления подводного аппарата, однако при этом создавал ограничения, связанные с необходимостью получения всех входных данных перед тем, как производить соответствующие операции над ними и распространять результаты всем заинтересованным сторонам.

Мультиагентный подход в основе своей предполагает использование параллельных и распределенных вычислений [15–32], что повлекло за собой необходимость решения специфических задач, связанных с синхронизацией процессов и обменом данными, при реализации функционирования мультиагентной СУ в имитационной модели.

**Целью работы** явилось решение задачи определения рациональных параметров обмена информацией между подсистемами-агентами в мультиагентной системе управления. Параметрами, влияние которых оценивалось, являлись: временной интервал между отправлением сообщений и количество одновременно отправляемых различных сообщений разным адресатам. Обмен информацией осуществлялся путем передачи пакетов сообщений между подсистемами-агентами, содержащих данные, команды, запросы, ответы. Выбор параметров обмена информацией осуществлялся на основе оценки надежности каналов передачи данных между подсистемами — агентами.

Для проведения исследований необходимо было разработать имитационную модель функционирования мультиагентной системы управления.

Оптимизация параметров обмена информацией между подсистемами-агентами была направлена на формирование каналов передачи данных со следующими свойствами:

- очередности, при которой канал сохраняет порядок передаваемых по нему сообщений;
- емкости канала, которая определяется количеством сообщений, которые могут находиться в канале в состоянии пересылки; канал считается переполненным, если число содержащихся в нем сообщений в точности совпадает с его емкостью;
- надежности, при которой канал считается надежным, если каждое сообщение, отправленное по этому каналу, обязательно будет доставлено получателю в единственном экземпляре и в том виде, в котором оно было.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- определены подходы к построению имитационной модели;

- разработаны имитационные модели каждой подсистемы-агента;
- разработано взаимодействие между подсистемами-агентами между собой;
- проведено тестирование имитационной модели функционирования мультиагентной СУ АНПА;
- определены параметры, оказывающие влияние на обмен информацией между агентами;
- определены критерии оптимизации обмена информацией между агентами;
- разработан подход к оптимизации параметров обмена информацией в мультиагентной СУ АНПА;
- проведены исследования по оптимизации параметров каналов обмена данными;
- по результатам исследований — выработаны рекомендации к выбору параметров обмена информацией между агентами мультиагентной СУ АНПА.

1. Описание особенностей функционирования мультиагентной СУ АНПА

Для того чтобы создать имитационную модель, адекватную реальной СУ АНПА, проанализируем особенности функционирования мультиагентной СУ АНПА.

В настоящее время круг задач, предназначенный для решения с помощью АНПА расширяется и усложняется. Усложнение задач связано, прежде всего, с переходом к полной автоматизации функционирования АНПА при выполнении миссии от начала и до конца.

Этапами выполнения миссии являются:

- переход из места базирования в назначенный район;
- поиск в назначенном районе назначенного объекта;
- осуществление с этим объектом заданного взаимодействия;
- возвращение в место базирования;
- причаливание к причальному устройству.

Это означает, что на перечисленных этапах все принятия решений должно производиться в автоматическом режиме. Автоматическое принятие решения достигается за счет реализации алгоритмов функционирования системы управления АНПА.

В состав СУ АНПА входят:

- подсистема управления, в которой осуществляется совместная обработка информации, поступающей от всех остальных подсистем СУ, ее анализ, принятие управленческих решений и выдача команд в подсистемы СУ и другие системы АНПА на исполнение принятых решений;
- подсистема освещения обстановки по гидроакустическому и другим (при необходимости) каналам наблюдения, обеспечивающая обнаружение и распознавание объекта поиска и навигационных препятствий;
- подсистема радиосвязи, обеспечивающая двустороннюю связь с взаимодействующими объектами;

— подсистема гидроакустической связи с взаимодействующими объектами и прием сигналов подводных маяков-ответчиков;

— навигационная подсистема, отвечающая за контроль текущих координат и параметров движения АНПА в трехмерном подводном пространстве, а также за выработку маршрута движения АНПА на всех этапах выполнения миссии;

— подсистема управления техническими средствами АНПА (двигателем, рулями, манипуляторами и др. механизмами);

— подсистема обеспечения причаливания АНПА, обеспечивающая высокоточный контроль текущего взаимного положения АНПА и причального устройства.

При использовании мультиагентной технологии агентами являются подсистемы СУ АНПА, представляющие собой по своей сути рациональные компоненты, характерными признаками которых являются:

— автономность, т.е. способность действовать самостоятельно, контролируя свои действия и внутреннее состояние;

— активность, т.е. стремление достичь поставленных целей;

— реактивность, т.е. адаптивное поведение как реакция на внешние воздействия;

— социальное поведение, т.е. взаимодействие с другими агентами для достижения согласованных решений;

— способность к самообучению.

**Особенности мультиагентной СУ.** СУ АНПА, как и любого другого робота, состоит из подсистем, основными из которых являются (рисунок 1):

— система взаимодействия с оператором для получения задания на выполнение миссии;

— интеллектуальная система, определяющая способы выполнения выданного задания;

— система восприятия, обеспечивающая освещение окружающей обстановки;

— система поведения, обеспечивающая движение АНПА в различных условиях: ограниченности для маневра, препятствий, мелководья и т.д.;

— система приводов, обеспечивающая функционирование движительно-рулевых механизмов для обеспечения перемещения АНПА из одной точки в другую.

Каждая подсистема СУ АНПА состоит из одного либо группы агентов (рис. 1). Каждый агент, в свою очередь, также может состоять из группы агентов. Например, подсистема поведения включает в себя агентов: «Ход», «Проход», «Обход».

Агент «Ход» формирует алгоритм движения к точке со стабилизацией глубины или высоты, поддерживая при этом определенную скорость, а также осуществляет корректировку положения АНПА по результатам обсервации, предполагает восстановление АНПА на маршрутной траектории путем движения по кратчайшему расстоянию

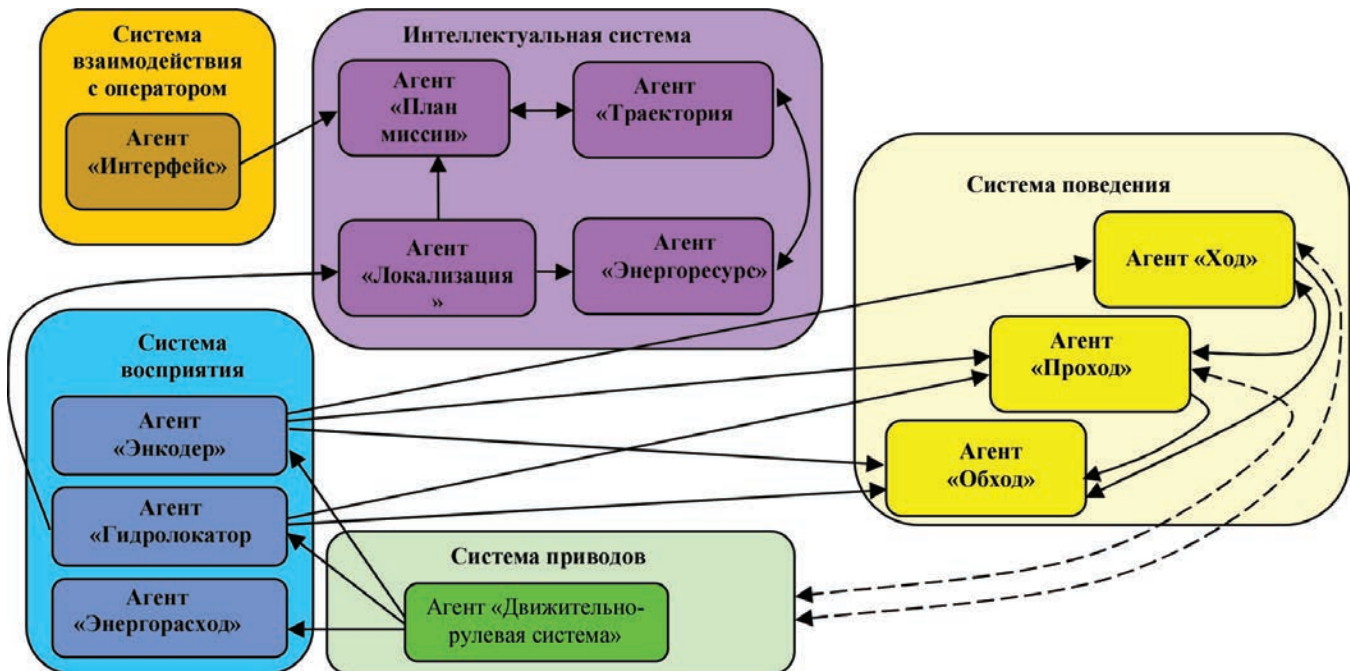


Рис. 1. Структура мультиагентной системы управления АНПА

от собственного положения до положения маршрутной траектории. Агент «Обход» формирует алгоритм обхода препятствия для предотвращения столкновения АНПА с возвышенностями и придонными объектами при их обследовании. Во время работы агент «Обход» использует данные от гидролокаторов для диагностирования препятствий и локальной карты препятствий. По результатам обработки данных алгоритм генерирует необходимые сообщения регулятору в случае их обнаружения агентом «Гидролокатор». По результатам работы алгоритма происходит огибание обнаруженных препятствий. Агент «Пролод» формирует алгоритм безопасного прохода АНПА в условиях ограниченного пространства, например, между объектами или препятствиями, находясь от всех них на безопасном расстоянии.

В процессе выполнения миссии в зависимости от возникающей ситуации задействуется тот или иной агент. Иногда между агентами движения происходит конфликт при одновременном обращении к одним и тем же ресурсам. В этом случае в результате взаимного общения происходит выделение агента с наибольшим приоритетом, управление которого в текущий момент времени передается в подсистему приводов для обеспечения перемещения АНПА.

2. Показатели надежности функционирования мультиагентной СУ АНПА

В качестве параметров, которые необходимо оптимизировать, были определены:

— объем переданной информации, выраженный количеством переданных сообщений как последовательно, так и квазипараллельно;

— темп передачи сообщений, характеризуемый частотой передачи пакетов сообщений и выраженными временными интервалами между отправлениями пакетов сообщений и сообщений внутри одного пакета.

Выбор параметров обмена информацией осуществлялся на основе оценки надежности каналов передачи данных.

Под надежностью канала передачи данных понимается вероятность приема адресатом всех переданных на отправку сообщений. Вероятность приема сообщений определяется отношением количества переданных на отправку сообщений к количеству отправленных и к количеству полученных сообщений.

3. Разработка имитационной модели функционирования мультиагентной СУ АНПА

Тестирование алгоритмов СУ АНПА в реальных условиях натурального эксперимента, в отличие от робототехнических комплексов воздушного и наземного применения, является крайне затратным мероприятием и экономически не всегда оправданным. Кроме того, результаты натурального эксперимента во многом зависят от условий, в которых они проводились, и не могут быть обобщены на другие

условия. Это означает, что основные исследования функционирования алгоритмов СУ АНПА необходимо проводить с использованием математического, и прежде всего, имитационного, моделирования [14].

Программная реализация комплексной имитационной модели для подобных систем ранее создавалась как единая, с использованием централизованных алгоритмов с последовательным моделированием процессов в одной программе. Такой подход был оправдан при моделировании централизованного принципа управления подводного аппарата, однако при этом создавал ограничения, связанные с необходимостью получения всех входных данных перед тем, как производить соответствующие операции над ними и распространять результаты всем заинтересованным сторонам.

Поэтому разработка имитационной модели функционирования АНПА с мультиагентной СУ потребовала разработки под каждую подсистему управления самостоятельной программы, взаимодействие между которыми осуществляется с использованием параллельных и распределенных вычислений [15–32], что повлекло за собой необходимость решения специфических задач, связанных с синхронизацией процессов и обменом данными.

При формировании имитационной модели переход к параллельным вычислениям потребовал решения двух основных задач [16]:

- распараллеливанию вычислений;
- реализации параллелизма задач;
- синхронизации процессов.

Из используемых в настоящее время двух основных подходов к распараллеливанию вычислений (параллелизм данных и параллелизм задач) был выбран параллелизм задач [16]. Особенности его являются большая гибкость и большая свобода при разработке программы, эффективно использующей ресурсы параллельного компьютера и, как следствие, возможность достижения максимального быстродействия.

При реализации параллелизма задач вычислительные задачи были разбиты на несколько относительно самостоятельных подзадач, и каждый процессор загружался своей собственной подзадачей. Для каждой подзадачи была написана своя собственная программа. Все эти программы обменивались результатами своей работы. При реализации распараллеливания вычислений путем параллелизма задач был минимизирован обмен данными между задачами, так как пересылка данных представляет собой наиболее ресурсоемкий процесс.

Кроме того, была решена задача синхронизации процессов, поскольку моделирование функционирования АНПА происходит с разной скоростью воспроизведения процессов в одном и том же такте имитации. Дополнительно были решены характерные для распределенных вы-



числений задачи, связанные с разной скоростью передачи данных и ухода часов каждого из вычислителей. Решение задачи синхронизации обеспечивалось путем упорядочивания событий и реализации логических часов [16], поскольку при моделировании функционирования АНПА имеет значение не точное время наступления того или иного события (например, события отправки или получения сообщения), а последовательность, в котором эти события происходили. Для реализации указанного подхода использована модель логических часов Л. Лэмпорта [16], отсчитывающая логическое время и используемая для упорядочивания событий, происходящих в различных процессах распределенной системы. Механизм логических часов позволил отслеживать причинно-следственный порядок событий распределенного вычисления и упорядочить события в одну или несколько последовательностей. Использование логического времени, отсчитываемого такими часами, значительно упростило разработку алгоритмов для распределенных систем.

В разработанной имитационной модели реализованы два основных сценария функционирования СУ АНПА:

- при загрузке миссии в АНПА;
- в ходе выполнения миссии.

**Сценарий 1.** В СУ АНПА передается план миссии и момент начала ее выполнения агенту «Интерфейс». Агент «Интерфейс» перенаправляет поступившее сообщение агенту «План миссии» для оценки необходимых энергоресурсов для выполнения миссии. При этом оценивается расстояние для прохождения миссии и скоростные режимы, исходя из времени на прохождение каждого участка. Полученные результаты расчетов передаются агенту «Траектория». Агент «Траектория» производит расчет необходимых ресурсов с учетом удельного расхода энергоресурса на единицу времени или на единицу расстояния. Результат расчета в виде потребного ресурса передается агенту «Энергоресурс». Агент «Энергоресурс» производит анализ возможности выполнения миссии путем сравнения потребностей в энергоресурсе с возможностями АНПА по запасам энергоресурса. Если ресурса достаточно для выполнения миссии, принимается, что миссия может быть выполнена, в противном случае агенту «Траектория» выдается сообщение о невозможности выполнения миссии. От агента «Траектория» сообщение о невозможности выполнения миссии передается агенту «План миссии», который, в свою очередь, передает его агенту «Интерфейс» для корректировки миссии. В случае достаточности энергоресурса для выполнения миссии оператору на экране выдается сообщение о том, что миссия принята. В случае положительного решения агента «Энергоресурс» относительно возможности выполнения миссии дальнейшее управление передается агенту «Траектория», тот, в свою очередь, передает агенту «План миссии». Агент «План миссии» передает агенту «Ход» сообщение о первом участке миссии. Агент «Ход» формирует параметры дви-

жения АНПА. В момент, когда текущее время совпадет с заданным временем начала выполнения миссии, которое отслеживает агент «План миссии», агенту «Движительно-рулевое устройство» передается сообщение о старте миссии и параметрах движения АНПА.

**Сценарий 2.** В ходе движения АНПА агент «Движительно-рулевое устройство» передает со своих датчиков данные в «Энкодер» о параметрах движения. Агент «Энкодер» определяет локальные координаты АНПА, оценивает пройденное расстояние между предыдущим и текущим положениями АНПА и передает полученные результаты агенту «Локализация» для определения глобальных координат (географических координат широты, долготы) положения АНПА. Агент «Локализация» осуществляет пересчет локальных координат в географические и передает данные агенту «План миссии» для оценки соответствия положения АНПА заданному маршруту. Постоянно происходит освещение окружающей обстановки с участием агента «Гидролокатор». Одновременно происходит оценка достаточности оставшегося энергоресурса для выполнения миссии, для чего производится запрос агенту «Энергоресурс», а от него запрос агенту «Энергорасход» о текущем расходе энергоресурса при текущем скоростном режиме. Агент «Энергорасход» производит оценку расхода, и результаты оценки передает агенту «Энергоресурс». Агент «Энергоресурс» производит расчет оставшегося энергоресурса и сравнивает его с необходимым запасом для завершения выполнения миссии. Если остаток близок к критическому, то миссия прекращается, о чем последовательно передается сообщение агенту «План миссии», затем агенту «Интерфейс». Если же оставшегося ресурса достаточно для выполнения миссии, то агент «Ход» вырабатывает параметры движения для обеспечения выполнения АНПА миссии. Вырабатываемые параметры движения АНПА передаются агенту «Движительно-рулевое устройство». Датчики агента «Движительно-рулевое устройство» постоянно передают данные о формируемых в процессе движения параметрах агенту «Энкодер». Описанный алгоритм циклически повторяется до тех пор, пока агент «Локализация» не сообщит о достижении первой маршрутной точки, или агент «Энергоресурс» не сообщит об окончании запасов энергоресурса и прекращении выполнения миссии.

На рис. 2 приведена диаграмма обмена информацией между подсистемами.

Имитационное моделирование функционирования СУ АНПА в рамках описанных двух сценариев позволяет полностью воспроизвести основные алгоритмы, используемые в решаемых СУ АНПА задачах.

**Тактический эпизод, используемый при проведении экспериментов.** При проведении исследований рассматривался тактический эпизод перехода АНПА из одной заданной точки в другую. Предполагается, что на пути

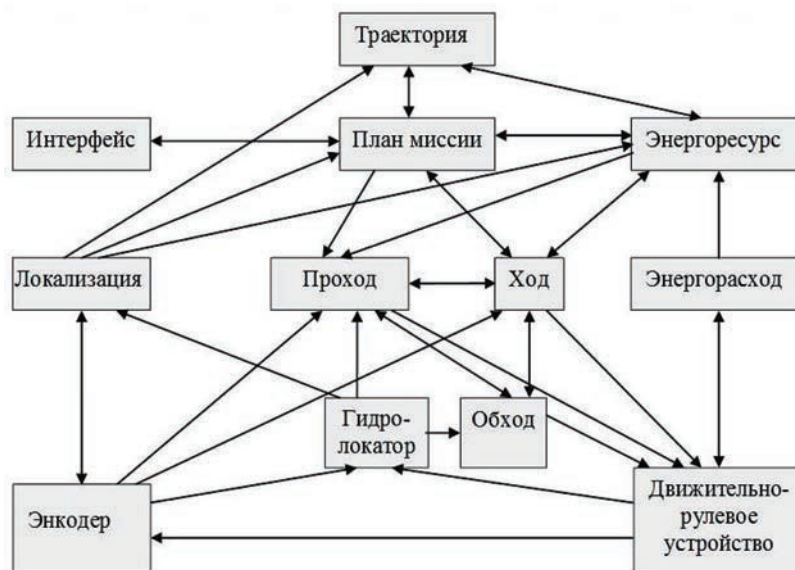


Рис. 2. Диаграмма обмена информацией между подсистемами

АНПА могут встретиться препятствия, формирующие узкости, и препятствия, требующие своего обхода. На рис. 3 приведена вид траектории движения АНПА при прохождении узкости и обходе препятствия.

На рис. 3 по характеру траектории перемещения АНПА видно, как в результате работы алгоритмов СУ АНПА в процессе выполнения задания АНПА маневрирует между препятствиями так, чтобы находиться на безопасном от них расстоянии, а при возникновении препятствия прямо по курсу — совершает его обход, и затем устремляется к заданной маршрутной точке.

В процессе имитации движения АНПА моделируется функционирование мультиагентной системы управления. При этом в процессе обмена информацией между агентами СУ АНПА в электронном журнале регистрируются отправленные и полученные агентами сообщения.

В каждом испытании при проведении численного эксперимента проигрывался один и тот же тактический эпи-

зод с различными параметрами обмена пакетами сообщений между агентами.

#### 4. Результаты численных экспериментов

При проведении численных экспериментов использовался ПК с характеристиками: процессор Intel (R) Core (TM) i3-2100 CPU @ 3.10GHz 3.10 GHz, ОЗУ 2.00 ГБ, 64-разрядная ОС Windows 7 SP1.

Эксперимент проводился в два этапа. На первом этапе исследовалось влияние временного интервала между переданными на отправку сообщениями — на результат отправления и приема сообщений. Для этого при различных значениях временного интервала оценивалась вероятность отправленных и полученных сообщений. На втором этапе исследовалось влияние количества одновременно переданных сообщений на успешность их приема при различной плотности потока отправляемых сообщений.

*На первом этапе* исследований при оценке влияния временного интервала между отправленными сообщения-

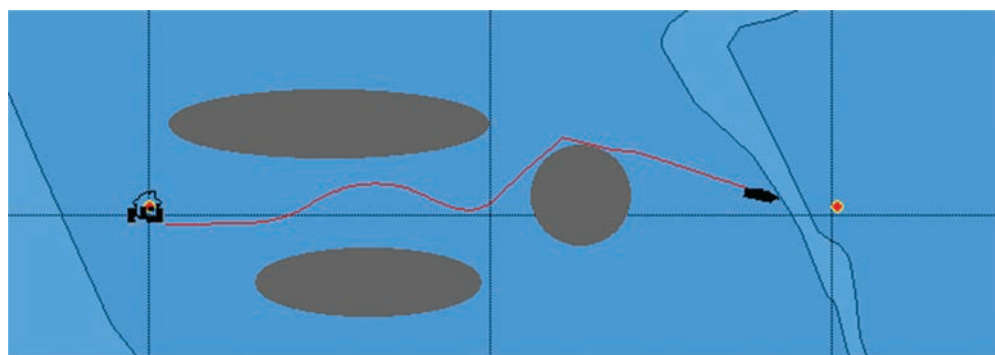


Рис. 3. Отображение тактического эпизода

ми в виде одиночного пакета — на успешность их приема адресатом, значение интервала изменялось от 0 до 100 мс с дискретностью 10 мс. Результаты моделирования приведены на рис. 4 в виде зависимости вероятности полученных сообщений от временного интервала.

Из результатов, представленных на рис. 4, видно, что с увеличением интервала между отправками сообщений от 0 до 70 мс вероятность полученных сообщений возросла от 0,15 до 1,00. Вместе с тем с увеличением временного интервала количество полученных сообщений сократилось в 2 раза. Так, при интервале в 0 мс было отправлено 790 сообщений, а при интервале в 70 мс — лишь 414 сообщений.

Приведенные результаты получены при отправке одиночного сообщения, однако при полноценном функционировании мультиагентной СУ характерным является «пакетная» отправка сразу нескольких сообщений, при которой квазипараллельно рассылается несколько сообщений различным агентам-адресатам.

Поэтому *на втором этапе* исследований проводились численные эксперименты по получению оценки влияния

количества сообщений в пакете на вероятность приема всех направленных на передачу сообщений.

Для более адекватной имитации этого процесса отправка сообщений в пакете производилась в цикле с использованием интервалов между отправлением сообщений внутри одного пакета.

При проведении численного эксперимента в качестве параметров обмена информацией были использованы: количество сообщений в пакете и интервал между отправками пакетов. Рассматривались три значения интервала между отправками пакетов: 10 мс, 40 мс и 70 мс. Для каждого из указанных значений перебиралось количество сообщений в одном пакете от 1 до 100 с интервалом в 10 сообщений. В результате оценивалось количество полученных сообщений для каждого варианта передачи сообщений.

Ниже на рис. 5, 6 и 7 приведены зависимости количества отправленных и полученных сообщений от количества сообщений в одном пакете для трех вариантов интервалов между отправками пакетов 10 мс, 40 мс и 70 мс соответственно. На рис. 8 приведены вероятности получения отправленных сообщений для этих же трех ва-

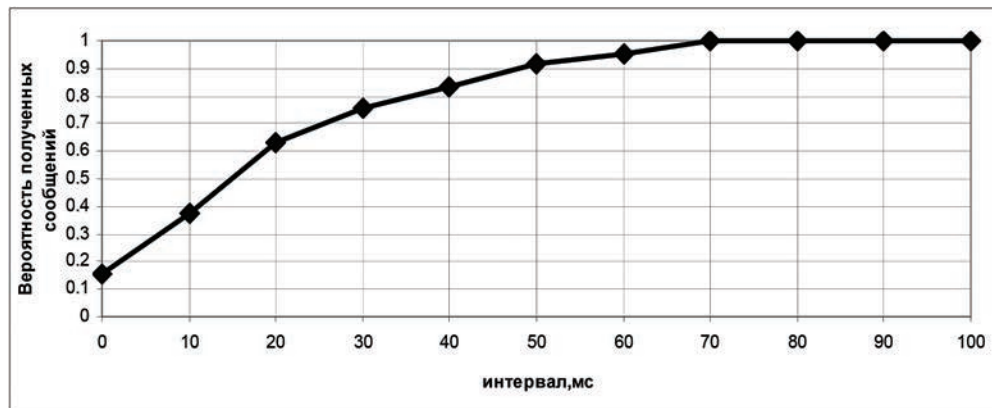


Рис. 4. Влияние временных интервалов между отправленными сообщениями на вероятность получения сообщений

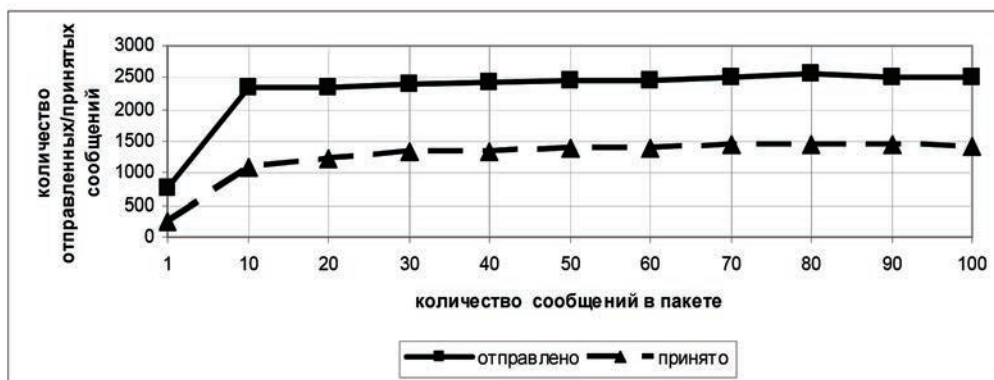


Рис. 5. Количество полученных сообщений при 10-миллисекундном интервале между отправками пакетов

риантов интервалов между отправлениями пакетов 10 мс, 40 мс и 70 мс.

Из рис. 5 видно, что при 10-секундном интервале наблюдается лишь частичное получение отправленных сообщений, практически — только половина, из рис. 8 видно, что при отправке пакетов, состоящих из 10-ти и 20-ти сообщений, вероятность получения сообщений оказалась на уровне 0,32–0,48 соответственно (штрихпунктирная линия). С увеличением количества сообщений в пакете до 30 вероятность полученных сообщений возросла до 0,53, и с дальнейшим увеличением количества сообщений в пакете до 100 вероятность возросла до 0,58.

На рис. 6 приведено количество полученных сообщений при 40-миллисекундном интервале, на рис. 8 (пунктирная линия) — результаты вероятности полученных и вероятности отправленных сообщений. Из рис. 6 видно, что количество отправленных и полученных сообщений при 40-миллисекундном интервале между отправлениями сообщений — совпадают. Вместе с тем количество отправленных/полученных сообщений меньше в 3 раза по

отправленным сообщениям и в 2 раза — по полученным сообщениям по сравнению с вариантом 10-миллисекундного интервала. Из рис. 8 видно, что при переходе от 10 мс интервала к 40 мс вероятность получения отправленных пакетов возросла более чем на 0,5.

На рис. 7 приведены результаты численного эксперимента для варианта 70-миллисекундного интервала между управляемыми сообщениями, на рис. 8 (сплошная линия) — результаты вероятности принятых и вероятности отправленных сообщений. Из рис. 7 видно, что объем передаваемой информации по сравнению с 10-миллисекундным интервалом сократился еще больше — в среднем на 500 сообщений, в то же время вероятность получения отправленных пакетов составила 1,00 (рис. 8).

Таким образом, результаты исследований обмена информацией между подсистемами-агентами при различных временных интервалах между отправлениями пакетов сообщений показали, что с увеличением временного интервала между отправлениями повышается надежность канала передачи данных, однако при этом падает объем передавае-

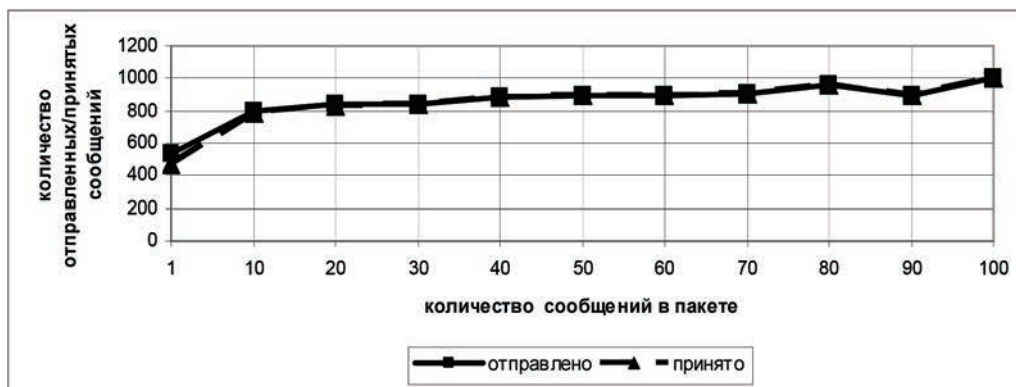


Рис. 6. Количество полученных сообщений при 40-миллисекундном интервале между отправлениями пакетов

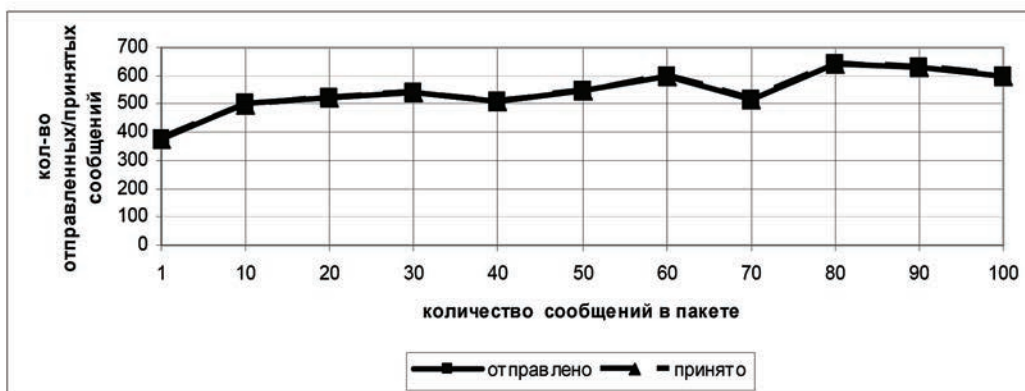


Рис. 7. Количество полученных сообщений при 70-миллисекундном интервале между отправлениями пакетов

мой информации. При увеличении временного интервала от 10 мс до 40 мс вероятность принятых сообщений выросла от 0,55 до 1,00. При дальнейшем увеличении временного интервала между сообщениями до 70 мс вероятность принятых сообщений осталась на том же уровне и составила 1,00. Вместе с тем объем передаваемой информации существенно зависит от интервала между отправлением пакетов сообщений. На рис. 9 приведен итоговый сводный график зависимости общего количества полученных сообщений от количества сообщений в одном пакете для различных значений временных интервалов между отправлениями пакетов.

Результаты имитационного моделирования позволили оценить влияние параметров обмена сообщениями между агентами в процессе функционирования мультиагентной СУ АНПА и позволили выявить оптимальный вариант параметров обмена информацией для рассматриваемых условий проведения численного эксперимента. Такими параметрами оказались:

— временной интервал между отправлением пакетов сообщений — 40 мс;

— объем квазипараллельно передаваемой информации — 800 сообщений.

Полученные в ходе исследований результаты позволяют более взвешенно подходить к выбору параметров обмена информацией между подсистемами-агентами при реализации мультиагентного подхода в системе управления автономного необитаемого подводного аппарата, определить объем передаваемой информации и темп ее передачи.

## Выводы

1. Особенности функционирования мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата были реализованы в имитационной модели ее функционирования, в которой каждой подсистеме-агенту соответствовала самостоятельная программа, а обмен данными между программами осуществлялся с использованием распределенных и параллельных вычислений.

2. С использованием разработанной имитационной модели были проведены исследования по определению рациональных параметров канала передачи данных.

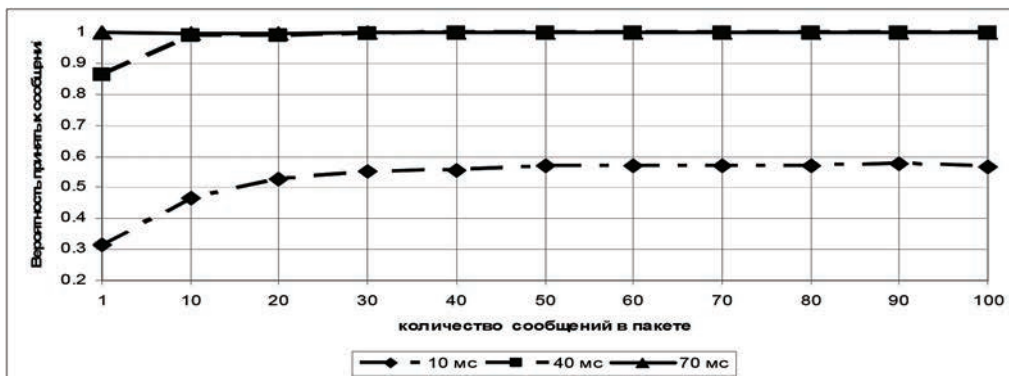


Рис. 8. Вероятность полученных сообщений

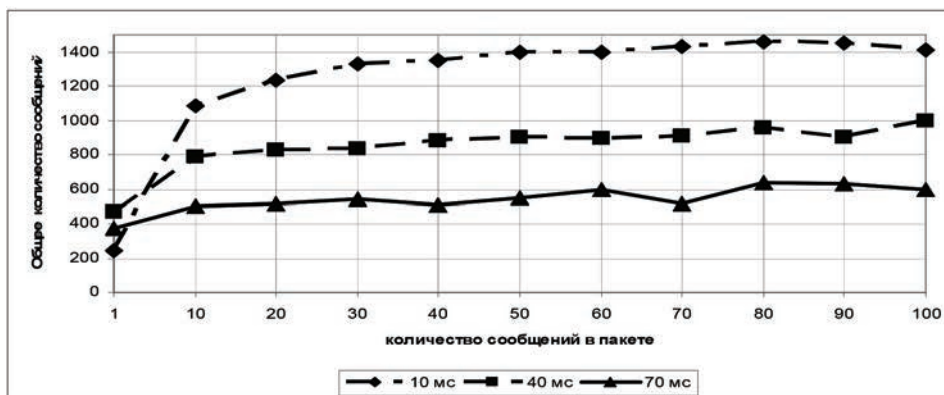


Рис. 9. Количество полученных сообщений

3. Результаты исследований показали, что с увеличением временных интервалов между отправлением сообщений повышается вероятность приема сообщений, но вместе с тем сокращается скорость передачи сообщений. Так, при отправке пакетов сообщений различного объема (от 1 до 100 сообщений в пакете) с интервалами 10 мс, 40 мс и 70 мс вероятность приема сообщений выросла от 0,55 до 1,00, однако при этом количество передаваемых сообщений сократилось с 1400 при интервале 10 мс до 850 при интервале 40 мс и до 600 при интервале 70 мс. Полученные результаты позволили выявить рациональный вариант параметров канала передачи данных между агентами: временной интервал между передачей сообщений — 40 мс, допустимый объем передаваемой информации — 800 сообщений.

4. Результаты исследований позволяют учесть полученные результаты при разработке алгоритмов мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований (проект № 17–08–00666).

## Литература

1. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / под ред. Агеева М. Д. М.: Наука, 2005, 398с.

2. *Инзарцев А. В. и др.* Применение автономного необитаемого подводного аппарата для научных исследований в Арктике // Подводные исследования и робототехника. 2007. № 2(4). С. 5–14.

3. *Гизитдинова М. Р., Кузьмицкий М. А.* Мобильные подводные роботы в современной океанографии и гидрофизике // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2010. Т. 3. № 1. С. 4–13.

4. *Боженев Ю. А.* Использование автономных необитаемых подводных аппаратов для исследования Арктики и Антарктики // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2011. Т. 4. № 1. С. 4–68.

5. *Millar G., Mackay L.* Maneuvering under the ice // Sea technology. 2015. Vol. 56. No. 4. Pp. 35–38.

6. *Илларионов Г. Ю., Сиденко К. С., Бочаров Л. Ю.* Угроза из глубины: XXI век. Хабаровск: КГУП «Хабаровская краевая типография», 2011. 304 с.

7. *Белоусов И.* Современные и перспективные необитаемые подводные аппараты ВМС США // Зарубежное военное обозрение. 2013. № 5. С. 79–88.

8. *Викторов Р. В., Илларионов Г. Ю., Квашиин А. Г.* Двойное применение автономных необитаемых подводных аппаратов типа "REMUS" // Двойные технологии. 2010. № 3. С. 54–62.

9. *Кузьмицкий М. А., Гизитдинова М. Р.* Мобильные подводные роботы в решении задач ВМФ: Современные технологии и перспективы // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2011. Т. 4. № 3. С. 37–48.

10. *Машошин А. И., Скобелев П. О.* Применение мультиагентных технологий для управления группой автономных необитаемых подводных аппаратов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 1. С. 45–59.

11. *Мартынова Л. А., Машошин А. И.* Построение системы управления автономных необитаемых подводных аппаратов на базе мультиагентной технологии. Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 2. С. 38–48.

12. *Мартынова Л. А., Розенгауз М. Б.* К вопросу о надежности автономного необитаемого подводного аппарата с мультиагентной архитектурой системы управления // Информационно-управляющие системы. 2016. № 5 (84). С. 25–34.

13. *Мартынова Л. А., Машошин А. И., Пашкевич И. В.* Система поддержки разработки алгоритмов системы управления АНПА // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 10. С. 178–190.

14. *Бусленко Н. П.* Моделирование сложных систем М.: Наука, 1978. 400 с.

15. *Мартынова Л. А.* Организация распределенных вычислений в имитационной системе моделирования работы автономного необитаемого подводного аппарата. Известия ЮФУ. Технические науки. 2017. № 2. С. 100–112.

16. *Косяков М. С.* Введение в распределенные вычисления. СПб: НИУ ИТМО, 2014. 155 с.

17. *Бродский Ю. И.* Модельный синтез и модельно-ориентированное программирование как технология реализации имитационных моделей сложных многокомпонентных систем, с ориентацией на параллельные и распределенные вычисления // Материалы конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика». ИММОД-2013. Казань: Фэн, 2013. Т. 1. С. 114–118.

18. *Бродский Ю. И.* Распределенное имитационное моделирование сложных систем М.: ВЦ РАН, 2010. 156 с.

19. *Вавилов Д. В.* Агрегирование и взаимодействие моделей в программных инструментальных средствах имитационного моделирования // Материалы конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика». ИММОД-2007, 2007. С. 38–41.

20. *Вавилов Д. В., Рыков В. В.* Агрегирование и взаимодействие имитационных моделей // Сб. докладов конференции «Состояние, проблемы и перспективы разработки корабельных информационно-управляющих комплексов». М.: ФГУП «НПО «Агат», 2005. С. 38–41.

21. *Davis Paul K.* Exploratory analysis enabled by multiresolution, multiperspective modeling // Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference. Pp. 113–115.

22. *Савин Г. И.* Системное моделирование сложных процессов. М.: Фазис: ВЦ РАН, 2000. 276 с.

23. *Chandy K. M., Lamport L.* Distributed snapshots: determining global states of distributed systems // ACM Transactions on Computer Systems. 1985. No. 3(1). Pp. 63–75.

24. *Chandy K. M., Misra J.* The Drinking Philosophers Problem ACM TOPLAS, 6:4. October 1984. Pp. 632–646.
25. *Charron-Bost B.* Concerning the size of logical clocks in distributed systems // Information Processing Letters. 1991. No. 39. Pp. 11–16.
26. *Charron-Bost B., Tel G., Mattem F.* Synchronous, asynchronous, and causally ordered communication Distributed Computing. 1996. No. 9(4). Pp. 173–191.
27. *Fidge C.* Logical time in distributed computing systems // IEEE Computer. August. 1991. Pp. 28–33.
28. *Fowler J., Zwaenepoel W.* Causal distributed breakpoints // Proceeding: of the 10th International Conference on Distributed Computing System. 1990. Pp. 134–141.
29. *Mattern F.* Virtual time and global states of distributed systems // Proceedings of die Parallel and Distributed Algorithms Conference (Cosnard, Quinton, Raynal, Robert Eds.). North-Holland. 1988. Pp. 215–226.
30. *Raymond K.* Tree-based algorithm for distributed mutual exclusion // ACM Transactions on Computer Systems. 1989. No. 7. Pp. 61–77.
31. *Raynal M.* A simple taxonomy of distributed mutual exclusion algorithms // Operating Systems Review. 1991. No. 25(2). Pp. 47–50.
32. *Ricart G., Agrawala A. K.* An optimal algorithm for mutual exclusion in computer networks // Communications of die ACM. 1981. № . 24(1). Pp. 9–17.
- Работа выполнена при поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований (проект № 17-08-00666).

---

## RESEARCH OF THE FUNCTIONING OF A MULTI-AGENT CONTROL SYSTEM FOR AN AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE USING SIMULATION

**Lyubov A. Martynova,**

St-Peterburg, Russia, martynowa999@bk.ru

**Alexey V. Grinenkov,**

St-Peterburg, Russia, grin\_a\_v@mail.ru

**Andrey O. Pronin**

St-Peterburg, Russia, pronin.a.o@gmail.com

**Julia V. Kulikovskikh,**

St-Peterburg, Russia, y\_shafranyuk@mail.ru

**KEYWORDS:** autonomous underwater vehicle; control system; multi-agent technology; information exchange; reliability of the communication channel.

### ABSTRACT

An autonomous underwater vehicle is considered, which is a complex technical complex of the marine habitat, which, in view of its complete autonomy, must make decisions in a fully automatic mode. When implementing the most promising approach to building a management system-multi-agent, one of the tasks that needs to be solved is the task of selecting parameters for information exchange between the agent subsystems. The task is to determine the rational parameters for infor-

mation exchange between the agent subsystems in the multi-agent control system. Parameters, the impact of which was estimated, were: the time interval between the sending of messages and the number of simultaneously sent different messages to different recipients. The exchange of information was carried out by sending message packets between the agent subsystems containing data, commands, requests, responses. The choice of parameters for information exchange

was carried out on the basis of an assessment of the reliability of data transmission channels between the agent subsystems. To carry out the research, an imitation model for the functioning of the multi-agent control system was developed. During the research, a tactical episode related to the movement of the underwater vehicle at the entrance to the narrowness, and then – when the obstacle was circumvented, and two scenarios for the functioning of the multi-agent control system were considered: the first – processing of the received task, and the second – the processing of information in the process of underwater vehicle movement the given route. Based on the results of the numerical experiments, it was possible to determine the most rational values of the information exchange parameters between the agent subsystems in the process of functioning of the multi-agent control system of an autonomous underwater vehicle.

## REFERENCES

1. Ageeva M.D. (Ed.) *Awtonomnye podwodnye roboty. Sistemy I technologii* [Autonomous underwater robots. Systems and technologies]. Moscow: Nauka, 2005. 398 p. (In Russian)
2. Inzarcev A.W. *Primenenie avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata dlja nauchnykh issledovaniy w Arctike* [The use of an autonomous uninhabited underwater vehicle for scientific research in the Arctic] *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater research and robotics]. 2007. No.2(4), Pp. 5-14. (In Russian)
3. Gizitdinowa M.R., Kuzmitskiy M.A. *Mobilnye podwodnye roboty w sowremennoi okeanografii i gidrofizike* [Mobile underwater robots in modern oceanography and hydrophysics] *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika* [Fundamental and applied hydrophysics]. 2010. Vol. 3. No. 1. Pp. 4-13. (In Russian)
4. Bajenov Ju.A. *Ispolzovanie avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov dlja issledovaniya Arctiki i Antarktiki* [Use of autonomous uninhabited underwater vehicles for the exploration of the Arctic and Antarctic]. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika* [Fundamental and applied hydrophysics]. 2011. Vol.4. No. 1. Pp. 4-68. (In Russian)
5. Millar G., Mackay L. *Maneuvering under the ice. Sea technology*. 2015. Vol. 56. No. 4. Pp. 35-38.
6. Illarionov G. Yu., Sidenko K.S., Bocsharov L. Yu. *Ugroza iz glubiny XXI weka*. [Threat from the depth: XXI century] Khabarovsk: KGUP "Khabarovskaja Krajevaja Toipografija". 2011. 304 p. (In Russian)
7. Belousov I. *Sowremennye i perspectivnye neobitaemye podvodnye apparaty WMS SSchA* [Modern and perspective uninhabited underwater vehicles of the US Navy] *Zarubejnoe woennoe obosrenie* [Foreign military review]. 2013. No. 5. Pp. 79-88. (In Russian)
8. Viktorov R.V., Illarionov G. Yu., Kwaschnin A.G. *Dwoynoe primeneniye awtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatow tipa "REMUS"* [Double application of unmanned un-
9. Kuzmitskiy M.A., Gizitdinowa M.R. *Mobilnye podwodnye roboty w reschenii zadach WMF Sowremennye technologii i perspektivy* [Mobile underwater robots in solving Navy tasks: Modern technologies and perspectives] *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika* [Fundamental and applied hydrophysics]. 2011. Vol. 4. No. 3. Pp. 37-48. (In Russian)
10. Mashohin A.I., Skobelev P.O. *Primeneniye multiagentnykh technologii dlja upravleniya gruppy avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatow* [Application of multi-agent technologies for the management of a group of autonomous uninhabited underwater] *Izvestiya YuFU. Technicheskie nauki* [Izvestiya SFU Technical sciences]. No. 1. 2016. Pp. 45-59. (In Russian)
11. Martynowa L.A., Mashoshin A.I. *Postroeniye sistemy upravleniya avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatow na baze multiagentnoy technologii* [Construction of a control system for autonomous uninhabited underwater vehicles based on multi-agent technology] *Izvestiya YuFU. Technicheskie nauki* [Izvestiya SFU Technical sciences]. 2016. No. 2. Pp. 38-48. (In Russian)
12. Martynova L.A., Rozengauz M.B. *K woprosu o nadegnosti avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata s multiagentnoy architekturoy sistemy upravleniya* [To the question of reliability of an autonomous uninhabited underwater vehicle with a multi-agent architecture of the control system]. *Informacionno-upravljajuchie siistemy* [Information management systems]. No. 5 (84). 2016. Pp. 25-34. (In Russian)
13. Martynowa L.A., Mashoshin A.I., Paschkevitch I.V. *Sistema poddergky razrabotki algoritmov sistemy upravleniya ANPA* [System for supporting the development of algorithms for the ANPA control system] *Izvestiya YuFU. Technicheskie nauki* [Izvestiya SFU Technical sciences]. 2015. No. 10. Pp. 178-190. (In Russian)
14. Buslenko N.P. *Modelirovaniye slognykh sistem* [Modeling of complex systems] Moscow: Nauka. 1978. 400 p. (In Russian)
15. Martynova L.A. *Organizatsiya raspredelennykh vychisleniy w imitacionnoy sisteme modelirovaniya raboty avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata* [The organization of distributed computing in the simulation system of modeling the operation of an autonomous uninhabited underwater vehicle] *Izvestiya YuFU. Technicheskie nauki* [Izvestiya SFU Technical sciences]. 2017. No. 2. Pp. 100-112. (In Russian)
16. Kosjakov M.S. *Wwedeniye w raspredelennyye wyschisleniya* [Introduction to distributed computing] SPb: Natsional'nyy issledovatel'skiy universitet informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki Publ., 2014. 155 p. (In Russian)
17. Brodskiy Ju.I. *Modelnyi sintez I modelno-orientirovannoye programmirovaniye kak tehnologija realizacii imitacionnykh modeley slognykh mnogokomponentnykh system, s orientaciyey na parallelnyye I raspredelennyye wyschisleniya* [Model



- synthesis and model-oriented programming as a technology for implementing simulation models of complex multi-component systems with an orientation toward parallel and distributed computations] *Materialy konferencii "Imitacionnoe modelirovanie. Teorija i praktika"* [Proceedings of the conference "Simulation modeling. Theory and practice", IM-MOD-2013]. Kazan: «Fen» Of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, 2013. Vol.1. Pp. 114-118. (In Russian)
18. Vavilov D.V. Agregirovanie i vsaimodeystvie modeley w programmnykh instrumentalnykh sredstvach imitacionnogo modelirovanija [Aggregation and interaction of models in software tools for simulation] *Materialy konferencii "Imitacionnoe modelirovanie. Teorija i praktika"* [Proceedings of the conference "Simulation modeling. Theory and practice" IM-MOD-2007]. Pp. 38-41. (In Russian)
19. Brodsky Yu.A. *Raspredelennoe imitacionnoe modelirovanie slognykh sistem* [Distributed simulation of complex systems] Moscow.: CC RAS, 2010. 156 p. (In Russian)
20. Vavilov D.V., Rykov W.W. Agregirovanie i vsaimodeystvie imitacionnykh modeley [Aggregation and interaction of models in software tools for simulation modeling]. *Sbornik dokladov konferencii "Sostojanie, problemy i perspektivy razrabotki korabelnykh informacionno-upravljajuchich kompleksov" M. FGUP NPO "Agat" Proceedings of the conference "Simulation modeling. Theory and practice". IMMOD-2005.* [Proceedings of the conference "Simulation modeling. Theory and practice". IMMOD-2005]. 2005. Pp. 38-41. (In Russian)
21. Davis Paul K. Exploratory analysis enabled by multiresolution, multiperspective modeling. Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference. Pp.113-115.
22. Savin G.I. *Sistemnoje modelirovanije slognykh processov* [System modeling of complex processes] Moscow: Fazis. Computing Center of the Russian Academy of Sciences. 2000. 276 p. (In Russian)
23. Chandy K.M. Lamport L. Distributed snapshots: determining global states of distributed systems. *ACM Transactions on Computer Systems*. 1985. No. 3(1). Pp. 63-75.
24. Chandy K.M. Misra J. The Drinking Philosophers Problem *ACM TOPLAS*. October 1984. No. 6:4. Pp. 632-646.
25. Charron-Bost B. Concerning the size of logical clocks in distributed systems *Information Processing Letters*. 1991. No. 39. Pp. 11-16.
26. Charron-Bost B., Tel G., Mattem F. Synchronous, asynchronous, and causally ordered communication *Distributed Computing*. 1996. No. 9(4). Pp. 173-191.
27. Fidge C. Logical time in distributed computing systems. *IEEE Computer*. August. 1991. Pp. 28-33.
28. Fowler J., Zwaenepoel W. Causal distributed breakpoints. Proceeding: of the 10th International Conference on Distributed Computing System: 1990. Pp. 134-141.
29. Mattern F. Virtual time and global states of distributed systems. Proceedings of die Parallel and Distributed Algorithms Conference. (Cosnard, Quinton, Raynal, Robert Eds.). North-Holland. 1988. Pp. 215-226.
30. Raymond K. Tree-based algorithm for distributed mutual exclusion. *ACM Transactions on Computer Systems*. No. 7. 1989. Pp. 61-77.
31. Raynal M. A simple taxonomy of distributed mutual exclusion algorithms. *Operating Systems Review*. 1991. No. 25(2). Pp. 47-50.
32. Ricart G., Agrawala A.K. An optimal algorithm for mutual exclusion in computer networks. *Communications of die ACM*. 1981. No. 24(1). Pp. 9-17.

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Martynova L.A., PhD, Senior Research Officer, Leading Researcher of the JSC CSRI Elektropribor;  
 Grinenkov A.V., Head of Department of the JSC CSRI Elektropribor;  
 Pronin A.O., Head of Group of the JSC CSRI Elektropribor  
 Kulikovskikh J.V., PhD, Research Officer at the JSC CSRI Elektropribor.

---

**FOR CITATION:** Martynova L.A., Grinenkov A.V., Pronin A.O., Kulikovskikh J.V. Research of the functioning of a multi-agent control system for an autonomous underwater vehicle using simulation. *H&ES Research*. 2017. Vol. 9. No. 5. Pp. 52-65. (In Russian)

# ПРИНЦИП РАЗРАБОТКИ АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ РОБОТОВ

## БАГУТДИНОВ

Равиль Анатольевич

---

аспирант Института кибернетики,  
ассистент, программист  
Томского политехнического  
университета, г. Томск, Россия,  
ravil\_bagutdinov@yahoo.com

## АННОТАЦИЯ

По аналогии с естественным миром, зрение является основной неотъемлемой составляющей робототехнических комплексов. В связи с чем, одной из актуальных задач в современной разработке роботов является решение проблемы создания новых, усовершенствованных систем, алгоритмов, методов и принципов пространственной навигации роботов. Применяемые в робототехнике системы оперируют различными операциями, некоторых из них может не быть или они могут быть объединены с другими, и выполняться в различной последовательности. Все эти системы отличаются широким разнообразием и предусматривают структурные и функциональные различия в зависимости от поставленной задачи. При работе в сложных условиях значительно усложняется круг решаемых задач с помощью роботов и, соответственно, возрастает необходимость в разработке универсальной системы технического зрения снабженной соответствующими средствами для решения сложных функциональных задач.

В результате можно создать систему для любого конкретного случая технического зрения, в разы превышающую возможности человеческого глаза. Возможности, эффективность и гибкость системы технического зрения существенно зависят от алгоритмического обеспечения. Особенности робототехнического программного обеспечения напрямую зависят от выбора аппаратных средств и алгоритмической поддержке системы для реализации поставленной задачи.

В данной работе автор подробно рассматривает такие аспекты в разработке мобильных роботов, как особенность решения робототехнических задач, актуальность разработки новых алгоритмических и программных средств, обеспечивающих эффективную поддержку всех режимов функционирования системы технического зрения. Применяемые подходы и текстовые выкладки выдвигаются на основе методов распознавания образов, дискретных преобразований, цифровой обработки изображений и системного анализа. В работе также рассматривается формирование 3D-моделей поверхности объекта, применительно к мобильным роботам, представлена обобщенная функциональная схема системы технического зрения робота. Результаты исследования будут полезны в различных системах мониторинга, системах модернизации управления, мультисенсорной обработки информации, при разработке робототехнических комплексов и систем.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** мультисенсорные системы; робототехнические комплексы; разработка мобильных роботов; системы технического зрения; системы машинного зрения; управление; обработка; 3D.

---

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Багутдинов Р.А. Принцип разработки алгоритмического обеспечения системы технического зрения роботов // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 5. С. 66-71.

## Введение

Характерной чертой роботов является наличие оператора, который при необходимости может повлиять на процесс автоматического управления. Здесь возникает ряд дополнительных требований для систем технического зрения (СТЗ), к тому же ни один датчик не является идеальным для решения определенной задачи. В отличие от алгоритмов анализа временных сигналов, обработка и анализ изображений являются более сложными, т. К. представляют собой три координаты и время. [1]

В процессе анализа литературы выявлено, что зачастую этапы анализа изображений рассматриваются как несвязанные между собой процессы. [10, 15]. Необходимо проводить комплексный анализ на протяжении всего исследования, при этом учитывать быстродействие вновь разрабатываемых алгоритмов (или их модификации). В работе [15] предлагаются методы сегментации, описывается возможность прямого доступа к исходному коду. Но, описанные в работе методы не совсем подходят для систем, функционирующих в режиме реального времени. В источниках [2, 6, 12] описываются геометрические и статистические методы обработки изображений, но не в этих работах опускаются моменты работы с динамическими объектами.

На сегодняшний день в трехмерных СТЗ применяются сложные аппаратно-программные средства (АПС), что оказывает влияние на быстродействие таких методов обработки при решении задач в реальном времени.

Эти проблемы можно избежать за счет упрощения алгоритмов и создание новых методов обработки таких данных, которые были бы более гибки в этом отношении. Для создания высокоэффективных 3D СТЗ необходимо исключить операцию сопоставления стереопар при анализе кадров, обеспечить получение пространственной видеoinформации одним подвижным видеодатчиком, повысить помехоустойчивость и разработать простое программное обеспечение — для получения трехмерного образа, необходимо определять стратегию для получения изображений, не хватающих проекций объекта на основании результатов обработки исходного изображения. На основе этих замечаний можно утверждать, что возможности существующих на современном этапе средств формирования и обработки изображений ограничены, поэтому при разработке видеосистем должны учитываться как требования к полноте и качеству поставляемой ими информации, так и возможности составляющих их элементов.

Описание принципа построения алгоритмического обеспечения СТЗ. Верная подборка определенных средств к построению СТЗ робота — имеет чрезвычайно важное значение для достижения нужных технических показателей и удовлетворения требований технического задания. Обычно СТЗ строится как совокупность аппаратных и программных средств. Аппаратные средства включают

в себя: — телекамеру (стандартную или специальную).— интерфейс, отличающийся только техническими параметрами (размер изображения, разрядность, способ ввода информации).— спецпроцессоры или сигнальные процессоры. Однако, независимо от используемых аппаратных средств, необходимо наличие алгоритмического и программного обеспечения для обработки данных полученной информации и выполнения соответствующих действий.

Программные средства принципиально отличаются от аппаратных возможностью быстрой перестройки алгоритма их функционирования под конкретную задачу. Они обычно реализуются с помощью универсальных вычислительных средств (компьютеров, мини- и микрокомпьютеров). На сегодняшний день известны многочисленные примеры, когда в лабораторных условиях систему зрения строили программным путем с использованием достаточно мощных ПК. Но даже в этом случае обычно допускались существенные упрощения реальности [11, 14]. Практическая эффективность этих исследовательских систем, как правило, была очень невысокой. Тем не менее, активное изучение многих аспектов зрительного восприятия позволило накопить определенный опыт по программной организации систем машинного зрения и отобрать полезные алгоритмы распознавания образов.

Аналогичный анализ проводился и при решении других задач. К примеру, дактилоскопический анализ на месте совершения преступления с целью идентификации личности или исследование характера деформации детали для выяснения причин разрушения [7, 8]. В этих случаях важным является как количественный, так и качественный анализ. Без подобного набора данных нет возможности оценить к примеру структуру стали, а при исследовании патологических аномалий клеток при диагностики рака, а также в других подобных исследованиях [16]. В этих случаях, кроме простейшего визуального наблюдения и сравнения, обязательно необходим подсчет, измерение и статистический анализ полученных данных [3–4, 9, 17]. С развитием новейших устройств обработки данных, создается всё более сложное математическое и программное обеспечение обработки изображений, акцент алгоритмов которых направлен на параметры контролируемого процесса. В результате получаем в перспективе возможность создания универсальной системы или технологии технического зрения, которая не будет не только уступать человеческому глазу, но даже превосходить её. Это позволит достиг совершенно новых, неожиданных по эффективности решений для различного класса задач [13]. Специфика функциональных возможностей такой системы будет напрямую зависеть от применяемых алгоритмов и новых методов обработки гетерогенных данных. Зачастую не всегда те или иные методы и алгоритмы могут успешно применяться при решении традиционных задач технического зрения в других областях, отсутствуют

унифицированные методов, которые были бы универсальны [5]. Это связано с тем, что СТЗ робота должна удовлетворять жестким требованиям, имеющим достаточно сложную реализацию. Чтобы выполнить задачу в реальном времени, используемые алгоритмы должны быть более простыми и допускать эффективную вычислительную реализацию. Но, высокий спектр задач и стремление к универсальности системы вынуждают отказаться от простых алгоритмических решений и перейти к сложным методам обработки и анализа видеоинформации. Стоит также отметить, что гибкость системы, возможно, организовать и за счет разнообразных алгоритмов с большим числом изменяемых параметров. Необходимо учесть также, что операторами роботов зачастую являются рядовые пользователи, а не высококвалифицированные специалисты, и зачастую они не владеют в полной мере математическими методами обработки видеоинформации, а также программированием. Указанная выше специфика решения робототехнических задач актуализирует разработку абсолютно новых АПС, которые бы эффективно поддерживали все необходимые режимы функционирования СТЗ робота. На рис. 1 показана обобщенная функциональная схема СТЗ робота.

Исходя из вышеизложенного, стоит отметить, что любой (АПС), решающая задачи с учетом времени должна характеризоваться определенными функционалом: прием данных с последующим анализом и обработкой, принятие решений и передачей результатов анализа для последующего обработки, если таковая потребуется.

## Заключение

Конфигурация такой системы зависит от платформы, управления при запуске, в его функции входит определения ядра и передача ему управления. АПС реализуется на языке ANSIC и является полностью кросс-платформенной. Для полноценного функционирования системы требуются системные сервисы. Предлагаемый принцип обеспечивает универсальность и гибкость управления системы на различной платформе. Применяемые в робототехнике СТЗ оперируют различными операциями, некоторых из них может не быть или они могут быть объединены с другими, и выполняться в абсолютно различной последовательности. Все эти системы отличаются широким разнообразием и естественно предусматривают некоторые структурные и функциональные различия в зависимости от поставленной задачи. Учитывая выше изложенное можно делать следующий вывод: при работе в сложных условиях значительно усложняется круг решаемых задач с помощью роботов и, соответственно, возрастает необходимость в разработке универсальной СТЗ снабженной соответствующими средствами для решения сложных функциональных задач возникающих (вытекающих) из условия работы.

## Литература

1. Адилов Р.М. Исследование и разработка методов анализа многоградационных растровых изображений в системах технического зрения: Дис... канд. техн. наук. Пенза, 2005. 176 с.

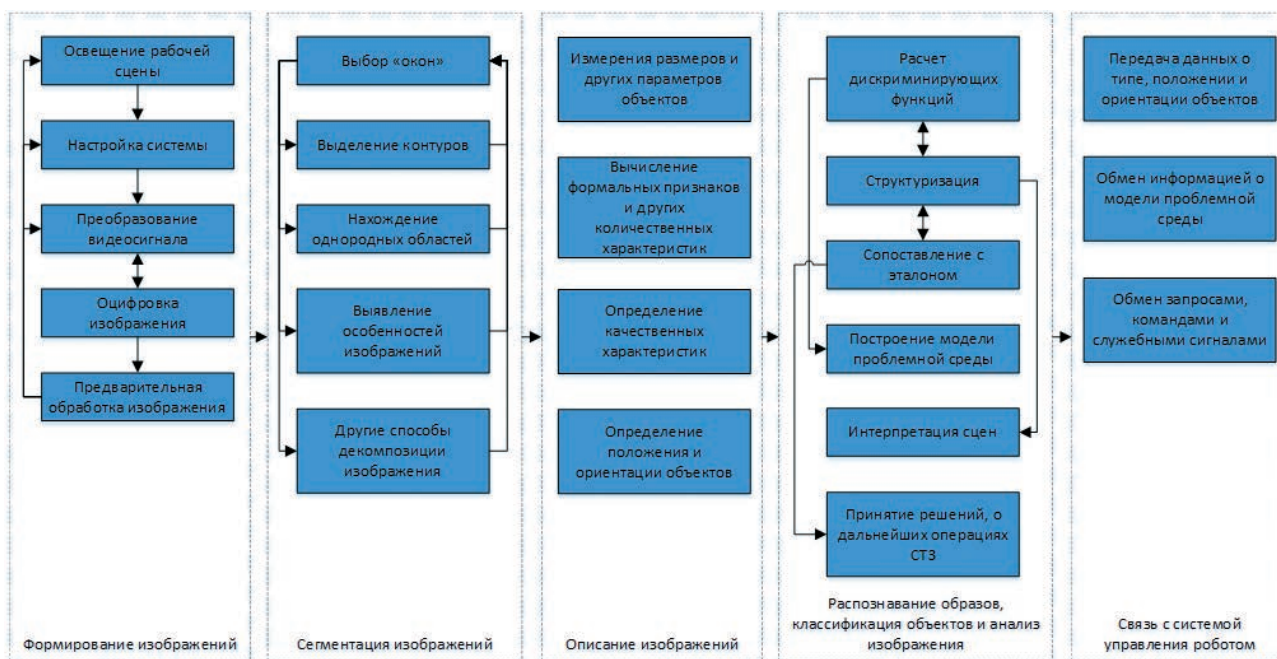


Рис. 1. Обобщенная функциональная схема СТЗ робота

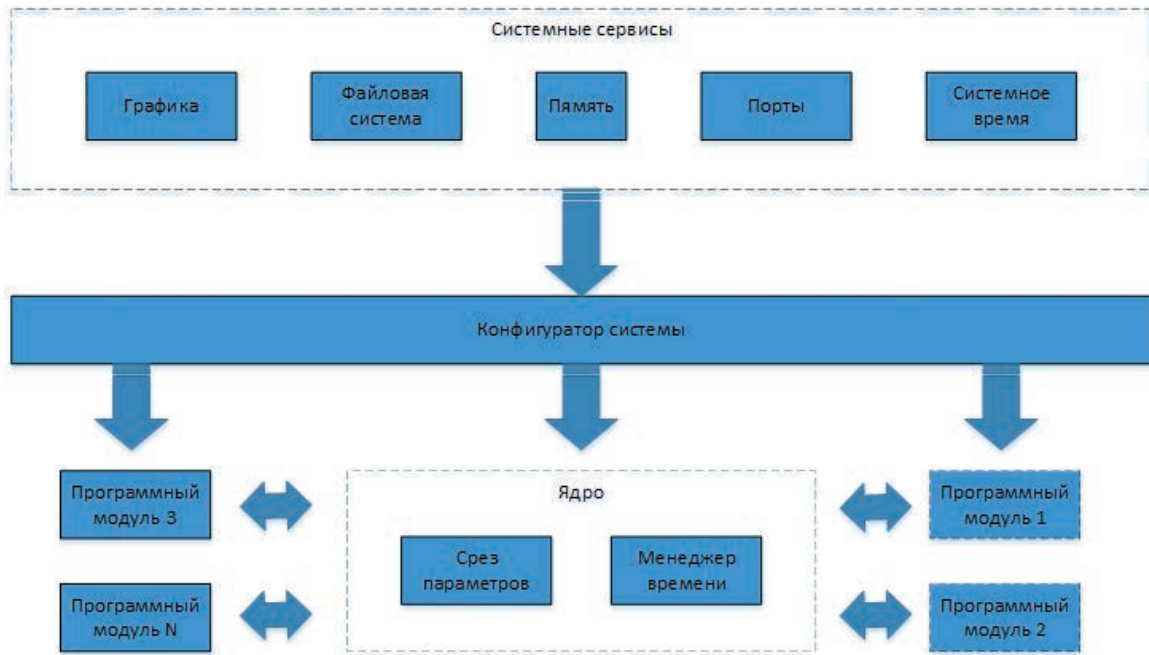


Рис. 2. Структурная схема программного комплекса

2. Анисимов Б. В. Курганов В. Д. Злобин В. К. Распознавание и цифровая обработка изображений. М.: Высшая школа, 1983. 295 с.

3. Багутдинов Р. А. Поход к алгоритмизации адаптивных систем технического зрения, применяемых в робототехнике // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации. Сборник статей победителей IV Международной научно-практической конференции (Пенза, 27 марта 2017). Пенза: 2017. С. 20–22.

4. Багутдинов Р. А. Гносеологические аспекты к определению назначения и состава СТЗ в задачах проектирования и разработки робототехнических комплексов // Программные системы и вычислительные методы. 2017. № 1. С. 39–45.

5. Воротников С. А. Информационные устройства робототехнических систем. М.: Изд. МГТУ им Н. Э. Баумана, 2005. 384 с., ил.

6. Методы компьютерной обработки изображений / под ред. В. А. Соифера. М.: Физматлит, 2001. 784 с.

7. Островский О. А. Криминалистическая портретная экспертиза по видеоизображениям, как форма определения личности // В сборнике: The Eleventh International Conference on Eurasian scientific development Proceedings of the Conference. Editor Jana Ilyna, Russia. 2016. С. 176–179

8. Островский О. А. Принцип объектной декомпозиции в систематизации идентификационных кодов, характеризующих преступления в сфере компьютерной информации // Полицейская деятельность. 2017. № 3. С. 10–18.

9. Поваркова А. В. Компьютерный анализ изображений: общие сведения, системы, примеры использования // Вестник инфектологии. URL: <http://www.infectology.ru/microscopy/today/analysis/index.aspx> (дата обращения: 08.09.2017)

10. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: в двух кн.: пер. с англ. М.: Мир, 1982. Кн. 1. 310 с., Кн. 2. 790 с.

11. Розенфельд А. Распознавание изображений: пер. с англ. // ТИИЭР. 1981. Т. 69. № 5. С. 120–133.

12. Семенов О. И, Абламейко С. В., Берейчик В. И., Старовойтов В. В. Обработка и отображение информации в растровых графических системах. Минск: Наука и техника, 1989. 180 с.

13. Семин, М. С. Прикладные задачи, решаемые с помощью систем технического зрения // Специальная техника. 2002. № 6. С. 12–17.

14. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника: пер. с англ. М.: Мир, 1989. 624 с.

15. Хорн Б. К. Зрение роботов: пер. с англ. М.: Мир, 1989. 487 с., ил.

16. Яньков В. В. Проверка аналитического решения о нагружении круглой пластины распределенной изгибающей нагрузкой / Высокие технологии в современной науке и технике // ВТСНТ НИ ТПУ. 2014. С. 404–407.

17. Zakharova A. A. Bagutdinov R. A. The task adaptation method for determining the optical flow problem of interactive objects recognition in real time [Electronic resource] // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 803: Information Technologies in Business and Industry (ITBI2016). [012014, 4 p.].

## PRINCIPLE OF DEVELOPMENT OF ALGORITHMIC SUPPORT OF THE SYSTEM OF TECHNICAL VISION OF ROBOTS

**RAVIL A. BAGUTDINOV**

Tomsk, Russia, ravil\_bagutdinov@yahoo.com

### ABSTRACT

By analogy with the natural world, vision is the main integral component of robotic systems. In this connection, one of the urgent tasks in the modern development of robots is to solve the problem of creating new, improved systems, algorithms, methods and principles of spatial navigation of robots. The systems of technical vision used in robotics operate with different operations, some of them may not be or they can be combined with others, and performed in an absolutely different sequence. All these systems differ in a wide variety and naturally provide for certain structural and functional differences depending on the task. When working in difficult conditions, the circle of solved problems becomes much more complicated with the help of robots and, accordingly, there is a growing need to develop a universal systems of technical vision equipped with appropriate means for solving complex functional problems.

As a result, you can create a system for any particular case of technical vision, which is several times greater than that of the human eye. The functionality, efficiency and flexibility of the STV are highly dependent on its algorithmic support. Features of the robotic software directly depend on the choice of hardware and algorithmic support of the operation of the systems of technical vision for the implementation of a clearly defined task.

In this article, the author examines in detail such aspects of the development of mobile robots as a function of solving robotic tasks, the urgency of developing new algorithmic and software tools that provide effective support for all operating modes. Applied approaches and textual calculations are advanced on the basis of image recognition methods, discrete transformations and digital image processing and system analysis. The work also considers the formation of 3D models of the object surface, applied to mobile robots; the generalized functional diagram of the systems of technical vision of the robot is presented. The results of the research will be useful in various monitoring systems, control modernization systems, multisensory information processing, in the development of robotic complexes and systems.

**KEYWORDS:** multisensory systems; robotic complexes; development of mobile robots; vision systems; machine vision systems; management; processing; 3D.

### REFERENCES

1. Adilov R.M. *Issledovanie i razrabotka metodov analiza mnogogradatsionnykh rastrovnykh izobrazhenii v sistemakh tekhnicheskogo zreniya: Dis... kand. tekhn. nauk* [Research and development of methods for analyzing multi-degradation raster images in vision systems. Dr. tech. sci. diss.]. Penza, 2005. 176 p. (In Russian)
2. Anisimov B.V. Kurganov V.D. Zlobin V.K. *Raspoznavanie i tsifrovaya obrabotka izobrazhenii*. [Recognition and digital image processing]. Moscow: Vysshaya shkola, 1983. 295 p. (In Russian)
3. Bagutdinov R.A. Podkhod k algoritmizatsii adaptivnykh sistem tekhnicheskogo zreniya, primenyaemykh v robototekhnike [The approach to algorithmization of adaptive vision systems used in robotics]. *Fundamental'nye i prikladnye nauchnye issledovaniya: aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovatsii. Sbornik statei pobeditelei IV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Fundamental and applied scientific research: current issues, achievements and innovations. Collection of articles of the winners of the IV International Scientific and Practical Conference, Penza, March 27, 2017]. Penza, 2017. Pp. 20-22. (In Russian)
4. Bagutdinov R.A. Gnoseologicheskie aspekty k opredeleniyu naznacheniya i sostava stz v zadachakh proektirovaniya i razrabotki robototekhnicheskikh kompleksov. *Programmnye sistemy i vychislitel'nye metody* [Software systems and computational methods] 2017. No. 1. Pp. 39-45. (In Russian)
5. Vorotnikov S.A. *Informatsionnye ustroystva robototekhnicheskikh sistem*. [Information devices of robotic systems]. Moscow: Izd. MGTU im N.E. Bauman, 2005. 384 p., il. (In Russian)
6. Soifer V. A. (Ed.) *Metody komp'yuternoi obrabotki izobrazhenii*. [Methods of computer image processing. Moscow: Fizmatlit, 2001. 784 p. (In Russian)
7. Ostrovskii O.A. *Kriminalisticheskaya portretnaya ekspertiza po videoizobrazheniyam, kak forma opredeleniya lichnosti* [Forensic portraits on video images, as a form of identification]. *The Eleventh International Conference on Eurasian scientific development Proceedings of the Conference*. Editor Jana Ilyna, Russia. 2016. Pp. 176-179. (In Russian)

8. Ostrovskii O.A. Printsip ob'ektnoi dekompozitsii v sistematizatsii identifikatsionnykh kodov, kharakterizuyushchikh prestupleniya v sfere komp'yuternoi informatsii. [The principle of object decomposition in the systematization of identification on codes characterizing crimes in the of computer information]. *Politseiskaya deyatel'nost'* [Police activity]. 2017. No. 3. Pp. 10-18. (In Russian)
9. Povarkova A.B. Komp'yuternyi analiz izobrazhenii: obshchie svedeniya, sistemy, primery ispol'zovaniya [Computer analysis of images: general information system, examples of use]. *Vestnik infektologii. Elektronnyi zhurnal* [Herald of infectious diseases. Electronic journal]. URL: <http://www.infectology.ru/microscopy/today/analvsis/index.aspx> (date of the application: 08.09.2017) (In Russian)
10. Prett U. *Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii: v dvukh kn* [Digital image processing]. In 2<sup>nd</sup> book. Moscow: Mir, 1982. B. 1. 310 p., Kn. 2. 790 p. (In Russian)
11. Rozenfel'd A. Raspoznavanie izobrazhenii [Image Recognition]. *TIIER*. 1981. T. 69. No. 5. Pp. 120-133. (In Russian)
12. Semenov O.I., Ablameiko S.V., Bereichik V.I., Starovoitov V.V. *Obrabotka i otobrazhenie informatsii v rastrovnykh graficheskikh sistemakh* [Processing and display of information in raster graphics systems]. Minsk, Nauka i tekhnika, 1989. 180 p. (In Russian)
13. Semin, M.S. Prikladnye zadachi, reshaemye s pomoshch'yu sistem tekhnicheskogo zreniya Tekst [Applied problems solved with the help of vision systems]. *Spetsial'naya tekhnika* [Spectral technology]. 2002. No. 6. Pp. 12- 17. (In Russian)
14. Fu K., Gonsales R., Li K. *Robototekhnika* [Robotics]. Moscow: Mir, 1989. 624 p. (In Russian)
15. Khorn B.K. *Zrenie robotov* [Vision of robots]. Moscow: Mir, 1989. 487 p., il (In Russian)
16. Yan'kov V.V. Proverka analiticheskogo resheniya o nagruzhennii krugloi plastiny raspredelennoi izgibayushchei nagruzkoi [Verification of the analytical on the loading of a circular plate by a distributed]. *Vysokie tekhnologii v sovremennoi nauke i tekhnike* [High technologies in modern science and technology]. *VTSNT NI TPU*. 2014. Pp. 404-407. (In Russian)
17. Zakharova A.A. Bagutdinov R.A. The task adaptation method for determining the optical flow problem of interactive objects recognition in real time [Electronic resource]. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. Vol. 803: Information Technologies in Business and Industry (ITBI2016). [012014, 4 p.].

#### INFORMATION ABOUT AUTHOR:

Bagutdinov R. A., Postgraduate Student of the Institute of Cybernetics, Assistant, Programmer of the Tomsk Polytechnic University.

**FOR CITATION:** Bagutdinov R. A. Principle of development of algorithmic support of the system of technical vision of robots. *H&ES Research*. 2017. Vol. 9. No. 5. Pp. 66-71. (In Russian)



ВОЕННО-КОСМИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ ИМЕНИ А.Ф. МОЖАЙСКОГО

22 НОЯБРЯ 2017

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

**III ВСЕРОССИЙСКАЯ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ  
КОНФЕРЕНЦИЯ**

[nauka-i-asu.ru](http://nauka-i-asu.ru)

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ  
И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

**H&ES**  
RESEARCH

при информационной поддержке  
научного журнала H&ES Research

[nauka-i-asu.ru](http://nauka-i-asu.ru)

[konferencia\\_asu\\_vka@mail.ru](mailto:konferencia_asu_vka@mail.ru)



# ПОДХОД К ОЦЕНИВАНИЮ СТРУКТУРНЫХ СОСТОЯНИЙ СЛОЖНЫХ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ОБОБЩЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ

**ОХТИЛЕВ**

**Павел Алексеевич<sup>1</sup>**

**БАХМУТ**

**Алексей Дмитриевич<sup>2</sup>**

**КРЫЛОВ**

**Алексей Валерианович<sup>3</sup>**

**ОХТИЛЕВ**

**Михаил Юрьевич<sup>4</sup>**

**СОКОЛОВ**

**Борис Владимирович<sup>5</sup>**

## АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрен подход к оцениванию структурных состояний сложных организационно-технических объектов при поддержке принятия решений по управлению их жизненным циклом. В качестве примера такого объекта выбрано космическое средство. При этом рассмотрены современные проблемы и предъявляемые требования при оценивании технического состояния и надежности космических средств. Было выявлено, что применяемые в рассматриваемой предметной области подходы не позволяют провести комплексное моделирование и оценивание состояния объекта мониторинга. Анализ предметной области показал необходимость применения новой интеллектуальной информационной технологии, представленной в статье, как при проектировании информационной системы сложного организационно-технического объекта, так и соответствующих систем мониторинга структурных состояний и поддержки принятия решения в составе такой информационной системы. При этом в качестве теоретической основы такой технологии рассмотрена модификация обобщенной вычислительной модели, представляющая собой унифицированную модель представления знаний, интегрирующую в себе ряд методов и подходов теории искусственного интеллекта и позволяющую строить имитационно-аналитические полимодельные комплексы мониторинга состояний и управления сложными организационно-техническими объектами. В статье показано, что в результате применения указанной технологии достигается комплексное оценивание технического состояния и надежности объекта мониторинга. При этом проведен краткий обзор программного комплекса, решающего задачи моделирования и оценивания структурных состояний космических средств. Программный комплекс реализован на основе рассмотренной интеллектуальной информационной технологии. Однако, было также отмечено, что применяемая в составе рассмотренной технологии модификация обобщенной вычислительной модели обладает рядом недостатков, устранение которых связано с задачами дальнейшего исследования.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** мониторинг состояния; система поддержки принятия решений; сложный организационно-технический объект; система искусственного интеллекта; информационная система; структурная динамика.

---

<sup>1</sup>аспирант, инженер-программист АО «Научно-исследовательский и опытно-экспериментальный центр интеллектуальных технологий «Петрокомета», г. Санкт-Петербург, Россия, pavel.oxt@mail.ru

<sup>2</sup>аспирант, инженер-программист АО «Научно-исследовательский и опытно-экспериментальный центр интеллектуальных технологий «Петрокомета», г. Санкт-Петербург, Россия, st.p.inomirje@gmail.com

<sup>3</sup>аспирант, начальник отдела оборонно-промышленного комплекса АО «Научно-исследовательский и опытно-экспериментальный центр интеллектуальных технологий «Петрокомета», г. Санкт-Петербург, Россия, KrAlex@yandex.ru

<sup>4</sup>д.т.н., профессор, временный генеральный директор АО «Научно-исследовательский и опытно-экспериментальный центр интеллектуальных технологий «Петрокомета», г. Санкт-Петербург, Россия, oxt@mail.ru

<sup>5</sup>д.т.н., профессор, заместитель директора Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской Академии Наук, г. Санкт-Петербург, Россия, sokol@iias.spb.su

---

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Охтилев П. А., Бахмут А. Д., Крылов А. В., Охтилев М. Ю. Соколов Б. В. Подход к оцениванию структурных состояний сложных организационно-технических объектов на основе обобщенных вычислительных моделей // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 5. С. 73-82.

## Введение

На сегодняшний день на практике в различных сферах встречаются сложные объекты (СЛО), сочетающие как технические, так и организационные аспекты [1–3]. Это означает, что в составе системы элементы могут быть представлены как аппаратно-программными и информационными комплексами, так и людьми, и система может иметь некоторую сложную структуру отношений между элементами. Такие объекты называют сложными организационно-техническими объектами (СОТО) [3]. Функционирование СОТО характеризуется сверхбольшими объемами информационных ресурсов различной природы, неполнотой и недоопределенностью информации о состоянии, высокой стоимостью ошибок, наличием директивного времени на принятие решения при управлении, наличием различного рода структур, изменяющихся во времени (структурная динамика): организационных структур предприятий, структур изделий, функциональных структур и пр.

В частном случае в качестве примера СОТО можно привести такое космическое средство ракетно-космической отрасли как ракета-носитель «Союз 2». Современный этап развития ракетно-космической отрасли (РКО) характеризуется возрастанием сложности космических комплексов и процессов управления ими. Ужесточаются требования к оперативности получения, качеству и достоверности результатов обработки и анализа информации при оценке технического состояния и надежности ракеты.

Так, например, может стоять задача создания единого виртуального электронного паспорта ракеты-носителя «Союз 2». Эта задача в частности предполагает необходимость интеграции данных о состоянии СОТО на различных этапах его жизненного цикла, начиная от проектирования и вплоть до утилизации. При этом возникает необходимость ведения аналитической деятельности по оцениванию уровня технического состояния и надежности изделия.

Решение специальных задач СОТО на всех этапах его жизненного цикла (ЖЦ) невозможно без обладания эффективными инструментами автоматизации процессов мониторинга и управления этапами ЖЦ СОТО и их изделий в составе единого информационного пространства [1].

Такое положение вещей требует разработки принципиально новых по идеологии построения и функциональным возможностям комплексов автоматизированной интеллектуальной обработки и анализа данных и поддержки принятия решения (ППР) при оценивании технического состояния и надежности СОТО на всех этапах его ЖЦ. При этом становятся особо актуальными вопросы эффективного совместного использования накопленных различными подсистемами СОТО информационных ресурсов, учета структурной динамики технического состояния СОТО в реальном режиме времени.

## Система информации о техническом состоянии и надежности космических комплексов и входящих в их состав изделий

В случае, когда речь идет о КК, автоматизированные комплексы мониторинга структурных состояний и ППР при управлении ЖЦ СОТО в соответствии с ГОСТ РО 1410–002–2010 должны функционировать в рамках системы информации о техническом состоянии и надежности КК и входящих в их состав изделий. Система информации предназначена для своевременного обеспечения федеральных органов исполнительной власти, заинтересованных предприятий и организаций, участвующих в создании, производстве и эксплуатации КК, достоверными сведениями, необходимыми для выполнения работ по обеспечению и повышению уровня технического состояния, качества и надежности комплексов и входящих в их состав изделий, совершенствованию систем менеджмента качества предприятий и организаций.

Работы по системе информации проводят на всех этапах ЖЦ изделий (при эскизном проектировании, разработке рабочей документации, наземной отработке, летных испытаниях, опытно и серийном (единичном) производстве и эксплуатации КК и входящих в их состав изделий).

Информационная система (ИС) стала неотъемлемой частью функционирования практически любой организации. Системность подходов к проектированию ИС остается злободневным вопросом [4]. ИС должна быть модульной, поддерживать работу с данными и знаниями напрямую с конечным пользователем (КП), должна осуществлять в автоматическом режиме:

- сбор, обработку и анализ (мониторинг) данных, фактов и сведений в режиме реального времени,
- контроль организационной и технической составляющих,
- поддержку лиц, принимающих решения, (ЛПР) по реализации целей СОТО,
- долгосрочное и краткосрочное планирование,
- качественное оценивание функционирования СОТО в условиях неполной и нечеткой информации и пр.

Существующие системы информации о техническом состоянии и надежности КК обладают рядом недостатков:

- большие объемы разнородной, зачастую неполной и недоопределенной информации о техническом состоянии и надежности КК не интегрированы и не систематизированы, соответственно, не созданы единые базы данных обо всем жизненном цикле КК и не сформировано единое информационное пространство РКО;
- наличие многочисленных, несовместимых между собой, выполненных на различных платформах, информационных систем;
- слабый уровень автоматизации аналитической обработки информации о техническом состоянии и надежности КК;

• ограничение оперативного доступа к информации о техническом состоянии и надежности КК, что приводит к снижению возможностей всех участников системы, а особенно заказчиков КК, объективно оценивать техническое состояние и достигнутый уровень надежности КК в режиме реального времени.

В результате возникает проблема комплексного оценивания технического состояния и надежности СОТО, которую можно проиллюстрировать следующим образом (рис. 1).

В соответствии с ГОСТ в составе КК должно быть подразделение системы информации, отвечающее за обработку данных об уровне технического состояния и надежности изделия на ЭВМ. Такое подразделение должно осуществлять:

- ввод информационных данных в машинную память;
- хранение информации о техническом состоянии изделий в машинной памяти;
- обработку информационных данных о техническом состоянии и с выдачей необходимых сведений и статистических материалов в отпечатанном виде;
- разработку математического обеспечения и отладку задач по обработке информационных данных о техническом состоянии изделий;
- разработку и внедрение автоматизированных систем информации о техническом состоянии изделий.

В настоящее время в космической отрасли предпринимаются попытки внедрить технологии электронного сопровождения наукоемкой продукции на всех этапах ЖЦ

(ИПИ (Информационная Поддержка Изделия)- или CALS (Continuous Acquisition and Life cycle Support)-технологии). ИПИ-технологии — это современный подход к разработке, производству, эксплуатации и обслуживанию изделий путем информационной поддержки их ЖЦ на основе электронного обмена данных [5]. Концепция ИПИ определяет правила, регламенты, стандарты по которым строится информационное взаимодействие участников проектирования, производства, испытаний и других этапов ЖЦ. При применении ИПИ значительно повышается эффективность деятельности предприятий за счет ускорения процессов исследования, разработки, сокращения издержек при производстве и эксплуатации изделий, существенного повышения качества выпускаемой продукции.

В качестве отечественного решения ИПИ в настоящее время предлагается новая технология построения системы информации о техническом состоянии СОТО на основе единых баз данных и знаний в составе распределенной вычислительной сети предприятий и организаций, участвующих в системе информации о техническом состоянии и надежности СОТО с использованием аппаратно-программных комплексов контроля/мониторинга технического состояния и надежности систем и элементов СОТО в реальном масштабе времени, разрабатываемых на основе интеллектуальных информационных технологий (ИИТ). Программное решение на основе ИИТ будем называть унифицированной программной платформой (УПП).

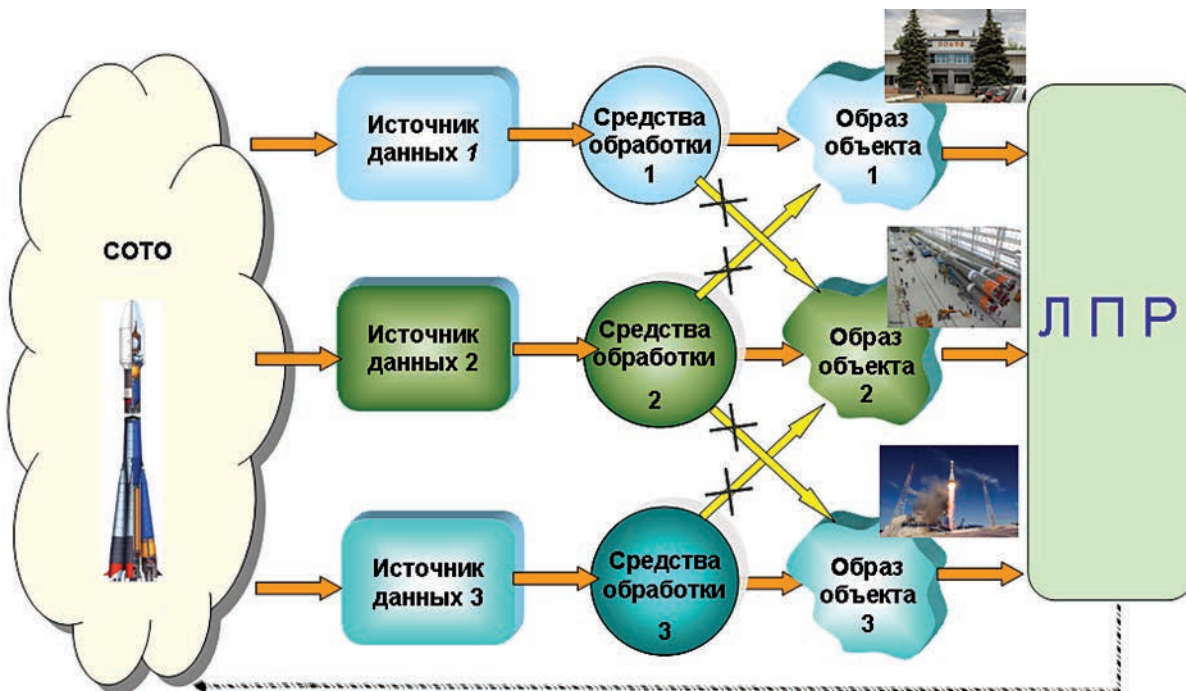


Рис. 1. Иллюстрация проблемы комплексного оценивания технического состояния и надежности изделия «Союз 2»

### Поддержка принятия решений на базе интеллектуальной информационной технологии

Одной из задач, решаемых при оценивании состояния СОТО, является получение достоверной информации о состоянии и уровне качества изделия на всех этапах ЖЦ и принятие на ее основе обоснованных управленческих решений, в том числе и по проведению, при необходимости, корректирующих мероприятий по устранению имеющихся несоответствий. Для решения поставленной задачи необходимо создание автоматизированной системы мониторинга структурных состояний и ППР по управлению ЖЦ СОТО, разрабатываемой в рамках УПП. УПП представляет собой программный комплекс, используемый в качестве инструментального средства для создания ИС на базе информационных моделей заданной предметной области при помощи соответствующей технологии. Таким образом, модели и алгоритмы в составе УПП должны быть направлены на помощь лицу, принимающему решения, (ЛПР) за счет повышения достоверности информации о состоянии СОТО.

Проектирование ИС на всех стадиях ЖЦ СОТО в рамках технологии УПП осуществляют профессиональные программисты и эксперты предметной области. При этом только эксперты предметной области с использованием специализированных средств (интеллектуального интерфейса и операционной среды проектирования) формиру-

ют (синтезируют) модели предметной области, алгоритмы анализа, оценки информации и принятия решений.

При этом используемыми ключевыми подходами являются следующие (рис. 2):

- онтолого-управляемая методология описания и представления объектов предметной области, интеграции разнородной информации, формализации данных и знаний;
- модели, методы и алгоритмы представления и визуализации данных и знаний;
- методы и алгоритмы автоматического синтеза программ анализа и оценки состояния информационных объектов (ИО);
- унифицированные методы достоверного распознавания состояний информационных объектов в условиях неполной и недоопределенной информации;
- методы и алгоритмы комплексного моделирования функционирования ИС;
- модели вычислений, реализующие произвольные схемы программ анализа, оценки и управления, отличающиеся от известных ранее ориентацией на доопределение значений оцениваемых параметров состояний и позволяющие формировать результат даже при отсутствии полного набора значений измеряемых (контролируемых) параметров информационных объектов;
- модели, методы и алгоритмы проактивного управления структурной динамикой оцениваемых ИО.

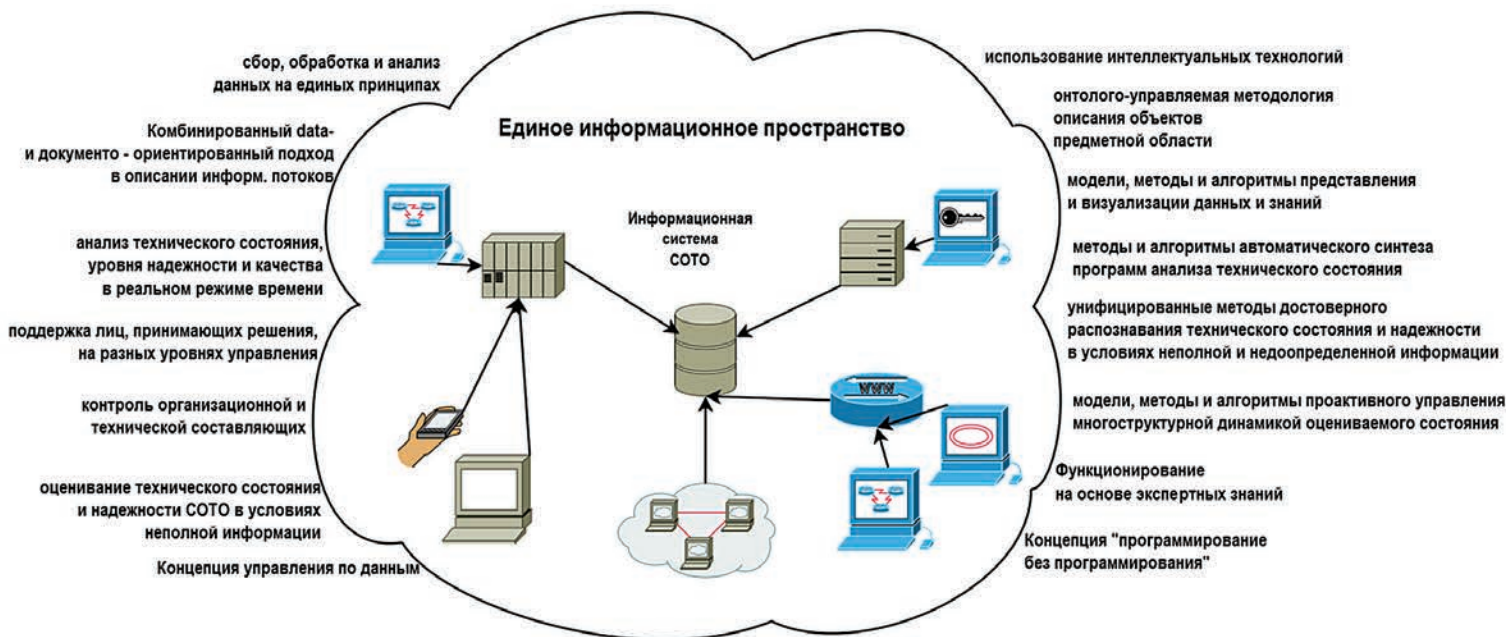


Рис. 2. Ключевые подходы при синтезе системы мониторинга структурных состояний и поддержки принятия решений по управлению ЖЦ СОТО

### Моделирование предметной области

Уникальность и сложность СОТО не позволяет использовать какие-либо готовые алгоритмы или методы, позволяющие имитировать или вычислять процессы, происходящие в составе СОТО. В подобной ситуации остаётся полагаться на знания экспертов предметной области за счет разработки соответствующего комплекса моделей предметной области, созданного с помощью некоторой интеллектуальной системы. Основным средством для автоматизированного интеллектуального анализа и имитации объектов и систем становится модель, в то время как алгоритм становится лишь инвариантной составной частью модели [6–7] (см. табл. 1).

Информационный облик СОТО представлен множеством информационных единиц и отношений между ними. Можно говорить о наличии структурных состояний (СтрС), характеризующих те или иные стороны функционирования СОТО, где каждая структура представлена определенным типом отношений: функциональных, каузальных, релевантности, структуризации и пр. С течением времени изменяются как состояния информационных единиц, так и состояния отношений между ними. В таком случае говорят о структурной динамике состояния СОТО [1]. Одним из возможных подходов оценивания СтрС при ППП по управлению ЖЦ СОТО является применение новой ИИТ, представленной комплексом моделей и алгоритмов [1, 8–10]:

- G-модель, как разновидность обобщенных вычислительных моделей (ОВМ), используемая в качестве модели представления знаний (МПЗ) о предметной области;
- модель «сущность-связь» в качестве модели представления данных (МПД);
- метаязык взаимодействия МПЗ и МПД, а также модели и алгоритмы формирования высказываний на этом языке на основе спецификации SQL;
- модель СтрС;
- прецедентная методика, как средство формирования выводов при ППП по управлению ЖЦ СОТО;

- методы проактивного управления, как прогностическое средство с позиции управления ЖЦ СОТО в составе ИИТ.

### Обобщенные вычислительные модели

Одним из средств концептуального моделирования и программирования предметной области являются ОВМ [11]. С точки зрения теории искусственного интеллекта (ИИ) ОВМ объединяют в себе 2 МПЗ: семантические сети и фреймы [12, 13]. Одной из разновидностей ОВМ является G-модель [6]. G-модель является основой для создания имитационно-аналитического полимодельного комплекса и возникла как результат обобщения существующих подходов в рамках систем ИИ: концептуальное программирование, программирование в ограничениях, мультиагентное моделирование и др. Синтезируемый на основе G-модели программный комплекс (ПрК) позволяет осуществлять оценивание состояния СОТО с применением методов теории распознавания образов. Целью ПрК является получение обобщенных оценок совокупности параметров состояния системы, значение которых в явном виде указывают на степень работоспособности СОТО, вид и место возникшей проблемы, прогнозируемые процессы и явления с заданной точностью и интервалом прогноза и пр.

G-модель описывается следующим кортежем:

$$M_G = (X, R_M, P_M, \Delta_M),$$

где  $X$  — конечное множество параметров (переменных), характеризующих процессы функционирования Сл О. Природа параметров может быть произвольной.

$R_M$  — конечное множество отношений на множестве параметров из,

$P_M$  — конечное множество предикатов, предметными переменными в которых являются элементы из.

$\Delta_M$  — отображение  $R_M \rightarrow P_M$  ставящее в соответствие каждому отношению из  $R_M$  элемент в  $P_M$ .

Таблица 1

Сравнительный анализ модели и алгоритма

МОДЕЛЬ	АЛГОРИТМ
Принципиально декларативна	В определенном смысле антидекларативна
Симметрична по отношению к параметрам, поскольку все они неявным образом определяются друг через друга	Разделяет параметры на входные и выходные, явным образом определяя вторые через первые
В неявной форме определяет решение всех задач, связанных с объектом модели	Определяет в явной форме задает решение только одной задачи, отношение которой к реальному Объекту не всегда очевидно
Может быть недоопределенной	Алгоритм и недоопределенность - несовместимые понятия
В общем случае определяет пространство решений	Традиционный (не интервальный) алгоритм позволяет получать только отдельные точечные решения

G-сеть (формируемую автоматически схему программы на основе G-модели) можно представить в виде операторной схемы и просто схемы (рис. 3).

Выразительные способности G-моделей позволяют представить любую стадию ЖЦ ИО в виде модели первичных и вторичных параметров, групп параметров, текстовых таблиц, 3D-мнемосхем статических и динамических, изменяющихся при изменении параметров, различных форм отображения, в виде различных логических, логико — лингвистических моделей, нечетких моделей, различных моделей обработки данных измерений.

Использование G-модели связано с формированием продукционной базы знаний (БЗ), наполняемой специалистом предметной области. Всеобъемлющая и детальная формализация заданной предметной области с помощью концептуальной схемы БЗ, иерархический способ представления знаний, набора объектов, понятий и их отношений формирует онтологию — точную спецификацию заданной предметной области. Она обеспечивает словарь для представления и обмена знаниями об этой предметной области и множество связей, установленных между терминами в этом словаре. В простейшем случае построение онтологии сводится к:

- выделению концептов — базовых понятий данной предметной области;
- построению связей между концептами — определению соотношений и взаимодействий базовых понятий.

### Информационная модель

В соответствии с теорией искусственного интеллекта совокупность моделей представления данных и знаний представляет собой информационную модель (ИМ) предметной области, позволяющую единым образом описать множества объектов, их свойства и связи между ними. ИМ должна представлять собой открытый, расширяемый стандарт, определяющий представление объектов ИС в виде сущностей и их отношений, опирающийся на объектно-

ориентированную технологию и единую систему понятий. Методология разработки ИМ, предполагает проведение ряда исследований, включающих элементы сравнения, типизации, классификации, обобщения, абстрагирования, повторения. Для реализации перечисленных требований, как правило, строится система моделей, которая описывает архитектурный (структурный) и оценочный аспекты предметной области. Архитектурный аспект (архитектурное описание) предполагает построение моделей:

- объектной структуры, отражающей состав взаимодействующих в процессах материальных и информационных объектов предметной области;
- функциональной структуры, отражающей взаимосвязь функций (действий) по преобразованию объектов в процессах;
- структуры управления, отражающей события и правила, которые воздействуют на выполнение процессов;
- организационной структуры, отражающей взаимодействие организационных единиц (структурных подразделений, персонала) в процессах;
- технической структуры, описывающей топологию расположения и способы коммуникации комплекса технических средств.

Для моделирования таких структур необходимо совместное функционирование МПД и МПЗ. Для описания модели данных может быть использована модель «сущность-связь» (или ER-модель) в качестве концептуального семантического представления схемы предметной области [14–15]. В качестве МПЗ выбрана G-модель.

### Основные элементы системы мониторинга структурных состояний и поддержки принятия решений по управлению жизненным циклом космических средств

В результате применения ИИТ и соответствующего набора моделей и алгоритмов был реализован ПрК мониторинга структурных состояний и ППР по управлению ЖЦ ракеты-носителя «Союз 2». Входными данными для ПрК

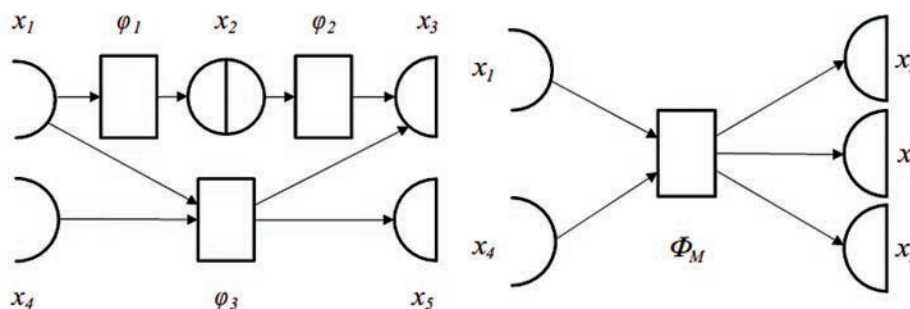


Рис. 3. Операторная схема (слева) и схема (справа) G-модели

являются документы и сведения, циркулирующие в составе ИС на различных этапах ЖЦ СОТО. Среди основных элементов ПрК можно выделить следующие (рис. 4).

Основным объектом, предоставляющим интерфейс доступа к консолидированным данным о СОТО на всех стадиях ЖЦ, является его электронная структура — ЭСИ. ЭСИ представляет собой «древовидную» структуру, содержащую детали, сборочные единицы, комплекты и комплексы, образующие состав изделия, а также ассоциированные с каждой такой составной частью информационные ресурсы СОТО — электронные данные, соответствующие стадиям ЖЦ СОТО. Таким образом, ЭСИ является методической основой представления инженерных данных об изделии.

Другим элементом ПрК является электронное дело изделия (ЭДИ), формируемое в результате наполнения ИС. Ведение электронного дела изделия на всех этапах ЖЦ позволяет организовать сбор, хранение, обмен, доступ ко всей необходимой информации об изделии на основе использования ЭСИ. Процесс оценивания СтрС и надежности СОТО предполагает включение в ЭДИ следующих данных: общие сведения о СОТО, описание состава эк-

земпляра СОТО, сведения об основных характеристиках составных элементов СОТО, сведения о выявленных и устраненных отказах и пр.

Для распределения потоков информации о СтрС СОТО используется организационно-штатная структура (ОШС) СОТО. ОШС представляет собой иерархическую структуру предприятия, реализованную на основе МПД. С каждым элементом ОШС связаны как элементы ЭСИ, так и соответствующие им атрибуты и состояния.

В составе ПрК реализована интерактивная интеллектуальная 3D- модель СОТО. Модель функционирует на основе потоковых вычислений, соответствующих принципам ОВМ. 3D-модель является визуализацией СтрС СОТО, полученного в результате семантического анализа данных в составе системы мониторинга. Изменение состояний элементов СОТО отражается на 3D-модели с помощью цветовой индикации.

Еще одним элементом ПрК является интерактивный интеллектуальный технологический график (ТГ) [16]. ТГ позволяет в режиме реального времени оценивать состояния происходящих процессов на основе потоковой модели

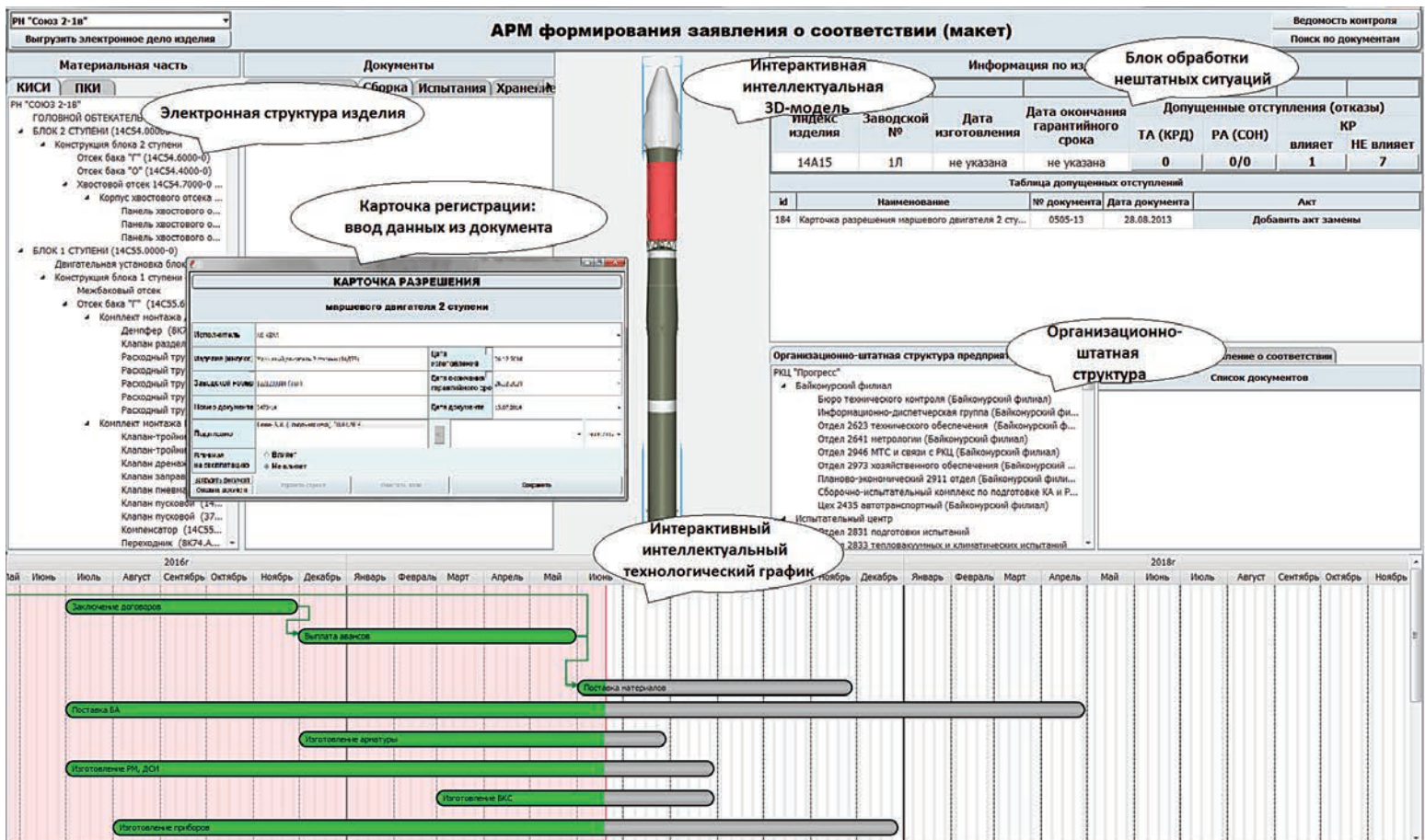


Рис. 4. Интерфейс программного комплекса поддержки принятия решений по управлению и контролю жизненного цикла космических средств

вычислений. Визуальные средства ТГ позволяют ЛПР наглядно оценивать текущий этап ЖЦ СОТО, степень готовности изделия, наличие/отсутствие отказов и неисправностей в составе СОТО, соответствие текущего этапа запланированному директивному времени.

Конечной целью ПрК ставится формирование комплексной оценки технического состояния и надежности изделия, и далее автоматическое формирование заявления о соответствии СОТО на основе полученных в результате мониторинга СтрС СОТО данных. Заявление о соответствии является формальным доказательством того, что СтрС СОТО соответствует заданным ограничениям, а изделие заданному уровню качества и надежности.

### Заключение

Рассмотренный подход оценивания структурных состояний при ППР на различных этапах ЖЦ СОТО в составе системы информации о техническом состоянии и надежности позволяет говорить о том, что применение в составе указанной системы новой ИИТ обеспечивает возможности комплексного оценивания технического состояния и надежности СОТО, что отвечает целям и задачам ЛПР. При этом достигаются: систематичность — онтология представляет целостный взгляд на предметную область; комплексность визуализации состояния СОТО — единый подход при реализации различных средств визуализации, за счет чего гораздо лучше воспринимается и воспроизводится информация; научность — построение онтологии позволяет восстановить недостающие логические связи во всей их полноте.

G-модель, как разновидность обобщенных вычислительных моделей, обладает рядом преимуществ для моделирования, оценивания, анализа и прогнозирования структурной динамики СОТО. Однако, поскольку G-модель не учитывает полноценно отношения структуризации, необходимые для разделения потоков информации по соответствующим элементам структур СОТО, необходимо создание полимодельных комплексов, отвечающих требованиям моделирования динамики соответствующих структур.

*Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации: СПб ГПУ (мероприятие 6.1.1), ИТМО (субсидия 074-U01), Программы НТС Союзного государства «Мониторинг-СГ» (проект 1.4.1-1), грантов РФФИ (№№ 15-07-08391, 15-08-08459, 16-07-00779, 16-08-00510, 16-08-01277, 16-29-09482-офи-м, 17-08-00797, 17-06-00108, 17-01-00139, 17-20-01214), госзадания Министерства образования и науки РФ № 2.3135.2017/К, в рамках бюджетных тем №№ 0073-2014-0009, 0073-2015-0007, Международного проекта ERASMUS +, Capacity building in higher education, № 73751-EPP-1-2016-1-DE-EPPKA2-CBHE-JP, Новые стратегии обучения инженеров*

*с использованием сред визуального моделирования и открытых учебных платформ.*

### Литература

1. *Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Интеллектуальные технологии мониторинга состояния и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
2. *Автамонов П.Н., Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Актуальные научно-технические проблемы разработки и внедрения взаимосвязанного комплекса унифицированных интегрированных систем поддержки принятия решений (СППР) в АСУ объектами военно-государственного управления // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2014. Вып. № 3(152). С. 14–27.
3. *Соловьев И.В.* Общие принципы управления сложной организационно-технической системой // Перспективы науки и образования. 2014. № 2 (8). С. 21–27. URL.: <https://pnojurnal.wordpress.com>. ISSN2307–2447
4. *Егорова А.А., Козлов С.А.* Информационные системы: методы и средства проектирования // Научный вестник МГТУ ГА. 2006. Вып. 105. С. 84–92.
5. *Норенков И.П.* Основы автоматизированного проектирования. 4-е изд., перераб. И доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 430 с.
6. *Охтилев М.Ю.* Основы теории автоматизированного анализа измерительной информации в реальном времени. Синтез системы анализа. СПб: ВИКУ имени А.Ф.Можайского, 1999. 161 с.
7. *Нариньяни А.С.* Модель или алгоритм: новая парадигма информационной технологии // Информационные технологии. 1997. № 4. С. 11–16.
8. *Крылов А.В., Охтилев П.А., Бахмут А.Д.* Использование прецедентной методологии при построении экспертных систем управления сложными организационно-техническими объектами // Научная сессия ГУАП, 2017.
9. *Охтилев П.А., Крылов А.В., Бахмут А.Д.* Обзор и применение моделей представления знаний в интеллектуальной системе мониторинга структурных состояний сложных организационно-технических объектов // Научная сессия ГУАП, 2017.
10. *Бахмут А.Д., Охтилев П.А., Крылов А.В.* Применение модифицированной сети Петри при задачи автоматизированной поддержки принятия решений по управлению сложной организационно-технической системой // Научная сессия ГУАП, 2017.
11. *Тьугу Э.Х.* Концептуальное программирование. М.: Наука, 1984. 255 с.
12. *Поспелов Д.А.* Искусственный интеллект. В 3-х кн. Кн. 2. Модели и методы: Справочник. М.: Радио и связь. 1990. 304 с.



13. *Гущин А. Н.* Основы представления знаний: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Балтийского государственного технического университета, 2007. 31 с.

14. *Петер Пин-Шен Чен.* Модель «сущность-связь» — шаг к единому представлению о данных: пер. с англ. М. Р. Когаловский // Системы управления базами данных. 1995. Вып. № 3. С. 137–158.

15. *Кузнецов С. Д.* Базы данных. Вводный курс. URL: «<http://citforum.ru>» (дата обращения: 28.03.2017)..

16. *Шмелев В. В., Мануйлов Ю. С., Богданов А. В.* Постановка задачи оптимального управления технологическим процессом на основе сетевой модели // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. 2015. № 648. С. 55–62.

---

## APPROACH TO ESTIMATION OF STRUCTURAL STATES OF COMPLEX ORGANIZATIONAL AND TECHNICAL OBJECTS BASED ON GENERALIZED COMPUTATIONAL MODELS

**PAVEL A. OKHTILEV,**

Saint-Petersburg, Russia, pavel.oxt@mail.ru

**ALEKSEY D. BAKHMUT,**

Saint-Petersburg, Russia, st.p.inomir@gmail.com

**ALEKSEY V. KRYLOV,**

Saint-Petersburg, Russia, KrAlex@yandex.ru

**MICHAEL YU. OKHTILEV,**

Saint-Petersburg, Russia, oxt@mail.ru.

**BORIS V. SOKOLOV,**

Saint-Petersburg, Russia, sokol@iias.spb.su

**KEYWORDS:** states monitoring; decision support system; complex organizational and technical object; artificial intelligence system; information system; structural dynamics.

### ABSTRACT

The approach to estimation of structural states of complex organizational and technical objects with the decision-making support on managing their life cycle is considered in the article. As an example of such an object, a space vehicle is chosen. At the same time, modern problems and requirements are considered in estimating the technical condition and reliability of space vehicles. It was revealed that the approaches used in the subject area do not allow complex modeling and estimating the state of the monitored object. The analysis of the subject area showed the need of application the new intellectual information technology presented in the article, both in the design of an information system of a complex or-

ganizational and technical objects, and the systems for monitoring structural states and supporting decision making as part of such an information system. At the same time, as a theoretical basis of such a technology, the modification of the generalized computational model is considered, which is a unified knowledge representation model that integrates a number of methods and approaches of the artificial intelligence theory and allows to build imitation-analytical poly-model complexes of monitoring states and managing complex organizational and technical objects. The article shows that as a result of applying this technology, a comprehensive estimation of the technical state and reliability of the mon-

itored object is achieved. At the same time, a short review of the software complex, which solves the problems of modeling and estimating the structural states of space vehicles, was carried out. The software complex is implemented on the basis of the considered intellectual information technology. However, it was also noted that the modification of the generalized computational model used in the technology considered has several drawbacks, the elimination of which is related to the tasks of further.

## REFERENCES

1. Okhtilev M. Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. Intellectual technologies for monitoring the state and managing the structural dynamics of complex technical objects. Moscow: Nauka, 2006. 410 p. (Informatics: unlimited possibilities and possible limitations). ISBN5-02-033789-7.
2. Avtamonov PN, Okhtilev M. Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. Actual scientific and technical problems of development and implementation of the interconnected complex of unified integrated decision support systems (DSS) in the ACS by the objects of military-state administration. *Izvestia of the Southern Federal University. Technical science*. 2014. № 3 (152) Pp. 14-27.
3. Soloviev I.V. General principles of managing a complex organizational and technical system. Perspectives of science and education. 2014. No. 2 (8). Pp. 21-27. <https://pnojurnal.wordpress.com>. ISSN2307-2447.
4. Egorova A.A., Kozlov S.A. Information systems: methods and design tools. Scientific bulletin of MGTU GA. Issue. 105 – Moscow: FGOUVPO MSTU GA, 2006. Pp. 84-92.
5. Norenkov I.P. Fundamentals of Computer Aided Design: Textbook. For universities. 4 th ed., Pererab. And add. Moscow: MSTU them. N.E. Bauman, 2009. 430 pp.
6. Okhtilev M. Yu. Basics of the theory of automated analysis of measurement information in real time. Synthesis of the analysis system. St. Petersburg: VIKU them. Mozhaisky, 1999. 161 p.
7. Narinyani A.S. Model or algorithm: a new paradigm of information technology. *Information technology*. 1997. № 4. Pp. 11-16.
8. Krylov A.V., Okhtilev P.A., Bakhmut A.D. Use of precedent methodology in the construction of expert management systems for complex organizational and technical objects. Scientific session of SUAU, 2017.
9. Okhtilev P.A., Krylov A.V., Bakhmut A.D. Review and application of knowledge representation models in the intellectual system for monitoring structural states of complex organizational and technical objects. *Scientific session of the GUAP*, 2017.
10. Bakhmut A.D., Okhtilev P.A., Krylov A.V. The application of a modified Petri net with the task of automated decision support for managing a complex organizational and technical system // Scientific session of the GUAP, 2017. (In press).
11. Tyugu E.H. Conceptual programming. Moscow: Nauka, 1984. 255 p. (Problems of artificial intelligence).
12. Pospelov DA Artificial Intelligence. In 3 kN. Book. 2. Models and methods: Handbook. Moscow: Radio and communication. 1990. 304 p.
13. AN Gushchin. Fundamentals of knowledge representation: textbook, handbook / A.N. Guschin; Score. State. Tech. Un-t.– St. Petersburg, 2007.–31 p. ISBN5-85546-285-4
14. Peter Pin-Shen Chen. The entity-relationship model is a step towards a unified view of data. *Trans. Database management systems*. Moscow: Open Systems, 1995. No. 3. Pp. 137-158.
15. Kuznetsov S.D. Database. Introductory course. Internet resource: "<http://citforum.ru>". (Date of circulation: 28.03.2017).
16. Shmelev V.V., Manuylov Yu.S., Bogdanov A.V. Statement of the problem of optimal control of the technological process on the basis of the network model. *Proceedings of the Military Space Academy. A.F. Mozhaisky*. 2015. No. 648. Pp. 55-62.

## INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Okhtilev P.A., Postgraduate Student, Engineer–Programmer of Scientific Research and Experimental Center of Intelligent Technologies “Petrokometa”;  
 Bakhmut A.D., Postgraduate Student, Engineer–Programmer of Scientific Research and Experimental Center of Intelligent Technologies “Petrokometa”;  
 Krylov A.V., Postgraduate Student, The Head of Department of the military industrial complex of Scientific Research and Experimental Center of Intelligent Technologies “Petrokometa”.  
 Okhtilev M. Yu., PhD, Full Professor, Temporary CEO of Scientific Research and Experimental Center of Intelligent Technologies “Petrokometa”;  
 Sokolov B.V., PhD, Full Professor, Deputy Director of The Federal State Institution of Science St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences.

**FOR CITATION:** Okhtilev P.A., Bakhmut A.D., Krylov A.V., Okhtilev M. Yu., Sokolov B.V. Approach to estimation of structural states of complex organizational and technical objects based on generalized computational models. *H&ES Research*. 2017. Vol. 9. No. 5. Pp. 73-82. (In Russian)

# VIII Международная конференция «Digital TV Russia 2017 – Перспективы развития Ultra HD 4K и 8K»

VIII Международная конференция «Digital TV Russia 2017 - Перспективы развития Ultra HD 4K и 8K» (DTV-2017) с успехом прошла 12 октября 2017 года в Москве. На DTV-2017 COMNEWS собрал более 150 ведущих экспертов отрасли: представителей телекоммуникационных и вещательных компаний, контент-провайдеров, вендоров, системных интеграторов, регуляторов и СМИ.

Официальным партнером DTV 2017 выступило НАО «Национальная спутниковая компания» («Триколор ТВ»), спонсором сессии - компания Comax. Конференция прошла при участии ЗАО «Первый ТВЧ», компаний Baker & McKenzie и GS Group.

Digital & Connected TV Russia 2017 прошла при поддержке НО «Ассоциация кабельного телевидения России» (АКТР), Национальной ассоциации телерадиовещателей (НАТ), Ассоциации дополненной и виртуальной реальности в России, Ассоциации интернет-разработчиков (АИР) и Международной академии связи (МАС).

Пленарная сессия конференции прошла в формате «Форсайт» и была посвящена телевидению будущего - каким будет рынок ТВ через два десятилетия.

Вторая сессия конференции под модерацией генерального директора Национальной Ассоциации Телерадиовещателей Александра Широких была посвящена созданию экосистемы на базе технологии Ultra HD 4K и перспективам вещания в Ultra HD 8K.

В рамках следующей сессии, модератором которой выступил генеральный директор Ассоциации «Интернет-видео» Алексей Бырдин,



участники обсудили инновационные вещательные технологии. Завершилась DTV-2017 дискуссией «Новые технологии в производстве и продвижении контента ультравысокой четкости (Ultra HD)». В обсуждении приняли участие исполнительный директор телеканалов ООО «Феникс-Т» («Феникс плюс кино», «Оружие», «Анекдот ТВ») Елена Антонович, управляющий директор ООО «Двадцатый Век Фокс Видеодистрибуция в России и СНГ» (20th Century Fox) Андрей Громковский, генеральный директор сети HDTV и 3DTV каналов HD Media ООО «НПК «ЭРА»; президент Ассоциации телевидения высокой четкости и цифрового кино; руководитель проекта ViNTERA Герасим Гадиян, генеральный директор ЗАО «Первый ТВЧ» Николай Орлов. Участники обсудили прогнозы роста уровня проникновения телевизоров, абонентских приставок и иного приемного оборудования с поддержкой Ultra HD; особенности и сложности

создания контента Ultra HD; возможности конвертации контента стандартного качества (SD) и HD в Ultra HD (4K и 8K); новые требования к инфраструктуре для доставки контента Ultra HD от производителя к вещателям и зрителям; бизнес-модель параллельного существования контента HD и Ultra HD; подходы к взаиморасчетам между контент-производителем и вещателем при трансляции контента Ultra HD; подходы к дополнительной монетизации контента Ultra HD и повышению ARPU в сетях платного ТВ; перспективы контента Ultra HD в нелинейных средах телесмотра и многое другое.

Участники форума высоко оценили уровень докладчиков и модераторов VIII Международной конференции «Digital TV Russia 2017 - Перспективы развития Ultra HD 4K и 8K», исключительные возможности налаживания деловых связей, качество организации мероприятия в целом.

# SYSTEM APPROACH TO ORGANIZATION OF CONTROL OF INFORMATION SUBSYSTEMS OF AUTOMATED CONTROL SYSTEMS FOR COMPLEX OBJECTS OF SPECIAL PURPOSE

**LEGKOV**

**Konstantin Evgenyevich<sup>1</sup>**

**LEVKO**

**Igor Vladimirovich<sup>2</sup>**

---

<sup>1</sup>PhD, Head of the Department of Automated Control System, Military Space Academy, Saint-Petersburg, Russia, constl@mail.ru

<sup>2</sup>PhD, Docent, Assistant Professor of the Department of Automated Control System, Military Space Academy, Saint-Petersburg, Russia, konferencia\_asu\_vka@mail.ru

**KEYWORDS:** system approach; automated control system; information subsystem; management processes; purposeful process.

**ABSTRACT**

Functioning of various modern complex objects of special purpose with high quality indicators is possible only with the organization of effective management of them, which is realized through automated control systems. In the control systems themselves, maintenance of continuity and the required level of quality indicators for the management of a complex special purpose object is ensured, among other things, by creating an information subsystem that provides officials of control organs and technical equipment complexes with the required nomenclature of information services, ensuring the adoption of justified correct decisions on the organization of management. At the same time, the information subsystem as a complex system must also be managed, for which, as a rule, a dedicated management system is created, which is assigned to a number of management tasks, the nomenclature of which is determined by the objectives of the subsystem, and their content - by the management methods that are laid in the special software of hardware complexes.

The objectives of managing the information subsystem will never be fully achieved, since for the formation and implementation of the management requires the time for which the information subsystem will change in an unexpected manner, as a result of which the management of it will certainly not lead to the strictly desired result.

The main way to overcome this is to extrapolate the behavior of the information subsystem with the identification of the direction of evolution of all its components.

---

FOR CITATION: Legkov K.E., Levko I.V. System approach to organization of control of information subsystems of automated control systems for complex objects of special purpose. *H&ES Research*. 2017. Vol. 9. No. 5. Pp. 84-91.

## INTRODUCTION

The information subsystem (ISS) of the automated control system (ACS) of special purpose objects (SPO), as a complex control object, should be characterized by some formal characteristics that must be taken into account in organizing management processes [1].

One of such signs is the impossibility of a complete mathematical description of both the ISS of the ACS SPO and its individual components [1–2].

Another sign is the stochastic behavior of the ISS of the ACS SPO [2], leading to difficulties in analyzing its state and its managing. This feature is due not only to the presence of some special sources of random interference in the components of the IS, but also to their complexity, which leads to a multitude of all kinds of minor (from the viewpoint of control purposes) processes. Therefore, the behavior of ISS of the ACS SPO often proves to be "unexpected" for the control system, and this "surprise" is more conveniently regarded as an accidental factor and interpreted as noisy than to conduct a detailed analysis of the mechanisms of the impact of secondary processes on the ISS of the ACS SPO.

The third sign is the well-known "intolerance" of the ISS of the ACS SPO to management. This feature is the most unpleasant feature of the ISS of the ACS SPO. The fact is that the ISS of the ACS SPO functions relatively independently from the control system, i.e. The ISS is intended [2] to provide information services (IS), and not for management. This is a certain contradiction, which increases if the objectives of management are not consistent with the objectives of the ISS of the ACS SPO.

Nonstationarity of the ISS of the ACS SPO is the fourth sign and follows from its complexity [1]. It manifests itself in the drift of the main characteristics, i.e. in the evolution of the ISS component in time. The consequence of nonstationarity is the following essential feature (sign) of the ISS of the ACS SPO — non-reproducibility of experiments, which consists in its different reaction to the same situation or control at different instants of time. This circumstance cannot be ignored when organizing the control system of the automated control system.

All these circumstances lead to the fact that the objectives of managing the ISS of the ACS SPO will never be fully achieved, since for the formation and implementation of the management requires the time for which the ISS of the ACS SPO will change in an unexpected manner, as a result of which the management of it will certainly not lead to the strictly desired result.

The main way to overcome this is to extrapolate the behavior of the ISS of the ACS SPO with the identification of the direction of evolution of all its components.

Further, under the management of ISS of the ACS SPO will be understood as the process of organizing such a focused impact on it, as a result of which the ISS (or its required component) goes into the required (target) state. [1–16]

## FORMULATION OF THE PROBLEM OF INFORMATION SUBSYSTEMS CONTROL ORGANIZATION

Let  $\mathbf{Z}_{IPsU}$  — the impact of the environment and the control system on the ISS of the ACS SPO, which belongs to the set of possible impacts  $\mathbf{Z}_{IPsU} \in \mathbf{Z}_{IPs}\theta$ ,  $\mathbf{S}_{IP}$  — the state of the ISS of the ACS SPO belonging to the set of possible states  $\mathbf{P}_{IP} \in \mathbf{P}_{IPs}$ , then the relationship between them can be represented by the following expression:

$$\mathbf{S}_{IP} = \mathbf{M}_{IP} \mathbf{Z}_{IPsU}, \quad (1)$$

where is the ISS of the ACS SPO model linking (environmental and management system impact on the ISS) and (ISS state) and characterizing the ISS of the ACS SPO specifics from the management point of view.

Considering the management of ISS of the ACS SPO as a purposeful process, we will single out the management objective, which actually determines what the ISS should be in terms of management. In general, the goal will be a vector, but the goal can also be specified by a scalar value.

It is possible to verify the fulfillment of the management objective in the ISS of the ACS SPO [1] only by its state:

$$\mathbf{C}_{IP} = \mathbf{E}[\mathbf{S}_{IP}]. \quad (2)$$

Usually they seek to express the goal in the language of the ISS of the ACS SPO state, in this case, the goal of the management is to translate the ISS into the required state, i.e.:

$$\mathbf{C}_{IPi} = \mathbf{S}_{IPi}. \quad (3)$$

With this approach, in the process of organizing the management of the ISS of the ACS will be determined by the existing unmanageable in the ISS. To resolve the emerging contradictions, it is advisable to consider the formal formulation of the control problems of the automated control systems of the automated control systems of automated control systems (fig. 1).

Let the vector  $\mathbf{S}_{IP}(t)$  determine the state of the ISS of the ACS SPO at the current time  $t$ . We assume that the ISS of the ACS SPO is an observable system, i.e. there is the possibility of a fairly accurate estimate of its state vector  $\mathbf{S}_{IP}(t)$  from the observation vector  $\mathbf{X}_{IP}(t)$ .

At any time, the ISS state vector  $t$  of the ACS SPO  $\mathbf{S}_{IP}(t) = [s_1(t), \dots, s_i(t), \dots, s_n(t)]$  displays its structure and the processes occurring in it. In the operation of the ISS, it is affected by interference and premeditated influences that quantify the entire range of natural and pre-measured impacts on the ISS of the automated control system (including hardware and software attacks or cyberattacks). The dimension and detailed components of the effects, as a rule, can not be determined, and their influence on the ISS manifests itself, first of all, in the

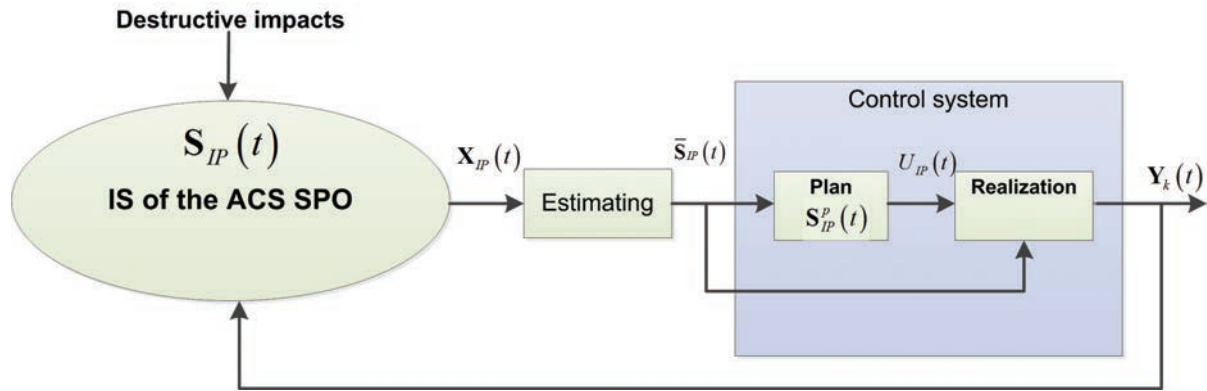


Fig. 1. Statement of the control problem of the automated control system

change of the state vector  $\mathbf{S}_{IP}(t + \Delta t)$  at subsequent instants of time  $(t, t + \Delta t)$ .

The control system "observes" the ISS of the ACS SPO, but because of interference and disturbance, it is not the vector  $\mathbf{S}_{IP}(t)$  itself that is available for measurement, but some observation vector  $\mathbf{X}_{IP}(t)$ .

We assume that the dimensions of the vectors  $\mathbf{S}_{IP}(t)$  and  $\mathbf{X}_{IP}(t)$ , and also the qualitative composition of their elements coincide. Then the vector estimate  $\mathbf{S}_{IP}(t)$  vector  $\bar{\mathbf{S}}_{IP}(t)$ , can be carried out by statistical methods of processing the vector  $\mathbf{X}_{IP}(t)$  components. Thus, the ISS control system of the ACS SPO on the observed vector  $\mathbf{X}_{IP}(t)$  receives an estimate  $\bar{\mathbf{S}}_{IP}(t)$  of the state vector  $\mathbf{S}_{IP}(t)$ .

The process of controlling the ISS of the ACS SPO is that each vector  $\bar{\mathbf{S}}_{IP}(t)$  must have a certain control vector  $\bar{\mathbf{U}}_{IP}(t)$  and the corresponding vector of control actions  $\mathbf{Y}_k(t) = [y_1(t), \dots, y_k(t)]$  that can be generated (in accordance with the control methods used) according to the corresponding control procedure (closed-loop control), or are given in advance for each value of the vector  $\bar{\mathbf{S}}_{IP}(t)$  (program control) in order to translate the ISS of the ACS SPO to the

planned state  $\mathbf{S}_{IP}^p(t)$ . And one and the other variant of the definition of the control vector  $\bar{\mathbf{U}}_{IP}(t)$ , provides for the provision of an extremum of some efficiency index:

$$\text{extr}_U W [t, \bar{\mathbf{S}}_{IP}(t), \mathbf{U}_{IP}] \quad (4)$$

However, this approach to the management objective of the ISS can cause significant difficulties, because in fact, it requires the determination of the planned value of the multidimensional state vector of the subsystem  $\mathbf{S}_{IP}^p(t)$ , comparing it with the estimation  $\bar{\mathbf{S}}_{IP}(t)$  of the existing state and producing it on the basis of the difference  $\Delta \mathbf{S}_{IP}^p(t) = |\mathbf{S}_{IP}^p(t) - \bar{\mathbf{S}}_{IP}(t)|$  of the control vector satisfying (4).

Therefore, when solving ISS management problems in a practical way, ACS SPO uses a different approach (fig. 2).

At the same time, the management goal is to maintain the performance indicators of the automated control systems at the given level or to provide the extreme value of the indicators in all operating conditions of the ISS.

In the process of management, along with assessing the state of the ISS of the ACS SPO  $\bar{\mathbf{S}}_{IP}(t)$ , assess the perfor-

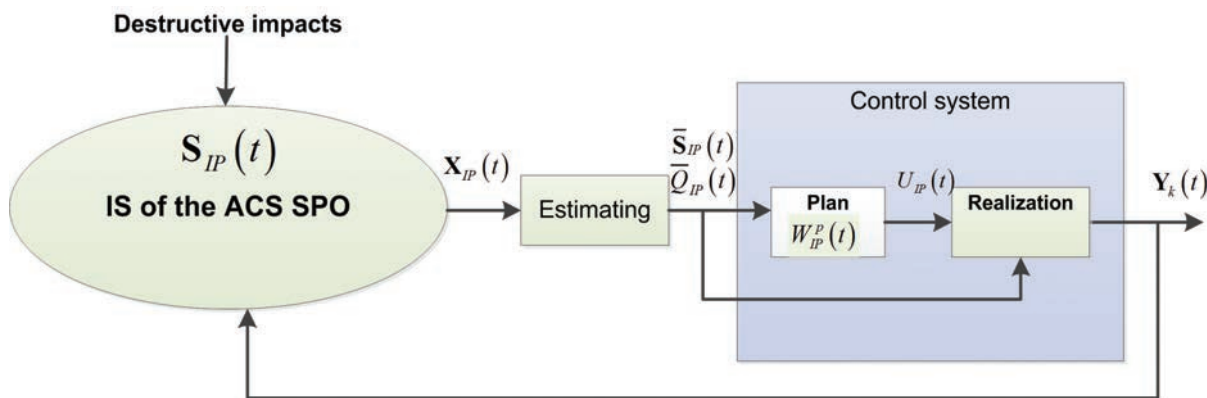


Fig. 2. Statement of the problem of control of the ISS of the ACS SPO (approach 2)

mance indicators of the ISS, determine the planned value  $W_{IP}^p(t)$ , compare it with the estimated value  $\overline{W}_{IP}(t)$  and output based on the difference  $\Delta W_{IP}^p(t) = |W_{IP}^p(t) - \overline{W}_{IP}(t)|$  in the control vector that ensures the value of the indicator is not worse than the specified value, or the conditions similar to (4):

$$\text{exstr}_U W \left[ t, \overline{\mathbf{S}}_{IP}(t), \overline{W}_{IP}(t), \mathbf{U}_{IP} \right]. \quad (5)$$

## SYSTEM APPROACH TO THE ORGANIZATION OF INFORMATION SUBSYSTEMS CONTROL

Next, we will consider the situation that has arisen in the ISS of the ACS SPO in its functioning, which is hereinafter referred to as an ordered set (triple):

$$\mathbf{S}_{IP}^{Si} = (\mathbf{Z}_{IPsU}, \mathbf{S}_{IP}, \mathbf{C}_{IP}). \quad (6)$$

The set (6) connects the ISS of the ACS SPO  $\mathbf{S}_{IP}(t)$ , the impact on it  $\mathbf{Z}_{IPsU}$  and the control objective  $\mathbf{C}_{IP}$  and shows that control  $\overline{\mathbf{U}}_{IP}(t)$  ultimately depends only on  $\mathbf{Z}_{IPsU}$  and  $\mathbf{C}_{IP}$ .

All the situations (6) that can occur in the process of controlling the ISS of the ACS SPO can be divided into two subsets of situations — manageable ones, in which a given goal is always achieved, and unmanageable when the goal is not achieved.

We denote by the set of all possible situations encountered in the process of controlling the ISS of the ACS SPO. Let  $\overline{S}_{IP}^{Si}$  be a subset of situations  $S_{IP}^{Si}(i) \in \overline{S}_{IP}^{Si}$  where the ISS is uncontrollable, i.e. not all of the goals  $\mathbf{C}_{IP}$  are achieved, but  $\overline{S}_{IP}^{Si} \in S_{IP}^{Si}$  a subset of situations where the IPS is manageable, i.e. all goals from  $\mathbf{C}_{IP}$  are achieved. It's obvious that:

$$\overline{S}_{IP}^{Si} \cup S_{IP}^{Si} = S_{IP}^{Si}. \quad (7)$$

To each element of the set  $\overline{S}_{IP}^{Si}$ , i.e. of each situation  $S_{IP}^{Si}(i) \in \overline{S}_{IP}^{Si}$ , we put into correspondence a number  $P(S_{IP}^{Si}(i))$  that determines the probability of occurrence of this situation. For real ISS of the ACS SPO, the number of elements  $S_{IP}^{Si}(i)$  of the set  $\overline{S}_{IP}^{Si}$  is so large that it is permissible to understand the density of this probability:

$$\int_{\overline{S}_{IP}^{Si}} P(S_{IP}^{Si}) dS_{IP}^{Si} = 1, \quad (8)$$

Equation (8) shows that real situations  $S_{IP}^{Si}(i)$  can not occur outside the realm  $\overline{S}_{IP}^{Si}$ .

In accordance with this, the probability that the situation  $S_{IP}^{Si}(i)$  that has developed in the ISS of the ACS SPO is manageable is

$$P_u = \int_{\overline{S}_{IP}^{Si}} P(S_{IP}^{Si}) dS_{IP}^{Si}, \quad (9)$$

where the integral is taken over a subset of controlled situations  $\overline{S}_{IP}^{Si}$ .

And the probability that the situation that has developed in the ISS of the ACS SPO is not manageable, is

$$P_r = \int_{S_{IP}^{Si}} P(S_{IP}^{Si}) dS_{IP}^{Si}, \quad (10)$$

where the integral is taken over a subset of uncontrolled situations  $S_{IP}^{Si}$ .

It's obvious that

$$\int_{\overline{S}_{IP}^{Si}} P(S_{IP}^{Si}) dS_{IP}^{Si} + \int_{S_{IP}^{Si}} P(S_{IP}^{Si}) dS_{IP}^{Si} = 1. \quad (11)$$

At the same time, for ISS of the ACS SPO it is characteristic that its functioning is carried out in difficult conditions, accompanied by a complex of destructive and informational influences of violators and the enemy, therefore it is not possible to give strict definition of sets  $\overline{S}_{IP}^{Si}$  and  $S_{IP}^{Si}$ , as well as functions  $P(S_{IP}^{Si})$ . In reality, only some expert evaluations of the function  $P(S_{IP}^{Si})$  can be obtained for different operating conditions of the ISS of the ACS SPO, which can be used to obtain estimated probabilities  $\overline{P}_u$  and  $\overline{P}_r$ . These values for various operating conditions will characterize the degree of controllability of the ISS of the ACS SPO.

The fulfillment of management objectives  $\mathbf{C}_{IP} = (c_{IP1}, \dots, c_{IPp})$ , in the final analysis, should guarantee the functioning of the ISS of the ACS SPO as a whole and its individual components with the required efficiency. Therefore, the ISS of the ACS SPO will be considered effective if it provides the required performance of the ISS itself under the conditions of impact on it and the control system of various natural and intentional disturbances and disturbances (including firmware or cyber-attacks), because the presence of all these disturbances in the course of the operation of the ISS of the ACS SPO or even to the failure of the fulfillment of the target tasks facing it.

In general, the performance index of the ISS of the ACS SPO is some functional  $W(t, \mathbf{V}_{IP}, \mathbf{Z}_{IPsU}, \mathbf{U}_{IP})$ , depends on the amount of requested IMS, the size and connectivity of the ISS structure of the ACS SPO, the performance of the ISS servers, the capacity of the virtual circuits, the functioning algorithms of the ISS and the requirements maintenance, ( $\mathbf{V}_{IP}$  — the vector of fixed, unreserved parameters and characteristics of the ISS of the ACS SPO), the load values of the requirements for obtaining IS, on the characteristics and the intensity of the disturbances, characterizing purposeful and accidental destructive effects on the components of the ISS, the impact of electronic warfare (EW) on them, the effects of natural disturbances, failures of ISS technical means and the cyber-attacks on the ISS hardware and software (form a perturbing parameters vector  $\mathbf{Z}_{IPsU}$ ), from control strategies ISS  $\mathbf{U}_{IP} \in \overline{\mathbf{U}}_{IP}$  is a control vector that determines the control actions  $Y_k(t)$  on

the components of the ISS produced by the ISS management system that belongs to the set of permissible controls  $U_{IP}$  that depends on the properties of the controllability of the ISS of the ACS SPO.

Since the main purpose of the operation of the ISS of the ACS SPO is to provide the SPO management bodies and the automation systems of ACS with all required IS with the required quality to the officials, if the ISS performance for a given time  $T_z$  is provided with a probability not less than the required  $P_{TR}$  despite the entire range of impacts on it, then the functioning of the ISS of the ACS SPO is recognized as sustainable, and its management is effective.

Practical implementation of ISS management processes of the ACS SPO should be based on a set of technological decisions taken in advanced technologies of network management (SNMP, NMS OSI, TMN [1–2]), on the basis of which management solutions are already being implemented in various industries not directly related to telecommunications: such as the nuclear industry, electric power, etc. It is natural to use the existing reserves and when solving the control problems of the automated control systems of automated control systems.

In accordance with the management standards [1–2], the following decomposition of the general task of managing the ISS of the ACS SPO into subtasks is appropriate: management of the operation of the ISS, management of the ISS structure, failures management, ISS resource management, ISS security management (fig. 3).

When organizing the management of the ISS of the ACS SPO, different task groups are distinguished by the importance, degree of influence on the current functioning of the IPS components, operational characteristics, the degree of participation of operators and managers in the management process, etc.

Thus, the task of managing the ISS resources of the ACS SPO, which is mainly related to the accounting, control and allocation of the use of ISS services resources, as well as to

inform managers about the amount of consumed resources for a certain period, to statistical processing of server employment data, and downloading the most important ISS resources and storing this information in the relevant databases, is a problem for the ISS of the ACS SPO under consideration with sufficiently low performance requirements.

Obviously, the most important task is the task of operation management of the ISS of the ACS SPO.

The task of structure management of the ISS, as a rule, is solved with a significant involvement managers of SPO which can only make a decision on changing the structure of the ISS and its components, and on adjusting existing structures. Therefore, the tasks of structure managing of the ISS of the ACS SPO are implemented as tasks of supporting the adoption of well-founded decisions of the ACS SPO managers. The requirements for the speediness of solving the problems of managing the ISS structure are much lower than for control tasks.

One of the tasks of managing of the ISS of the ACS SPO is the task of identification and elimination of failures management of the ISS, the need for which is caused by informal operation of ISS facilities and services, misuse of resources, and when the ISS equipment management subsystem is in a state of exhaustion. At the same time, in most practical control systems this task is largely degenerate, since many questions from the list are solved within the subsystem of operation of the automated control system of the SPO.

Undoubtedly, one of the most important tasks of the ISS of the ACS SPO managing is the task of its security management, which involves solving a number of tasks related to the ongoing management of security incidents, the management of security policies, the management of security risks, and the management of ISS security tools.

Experience in the practical implementation of control systems for various information systems, which is useful for organizing ISS of the ACS SPO, shows that fairly effective con-

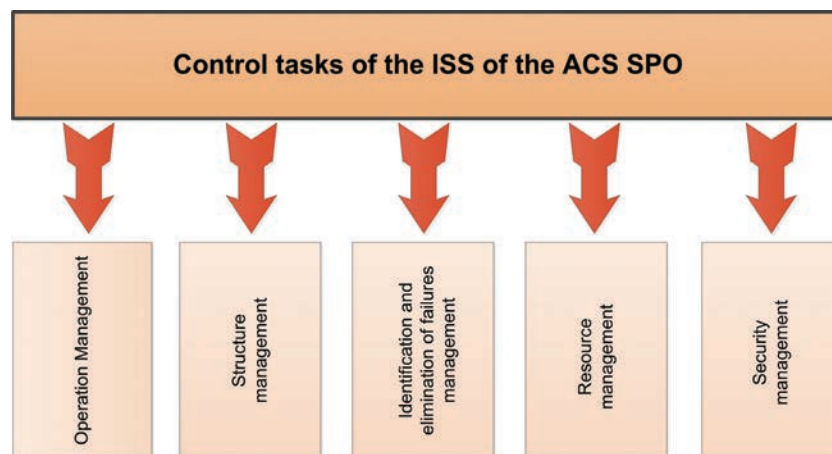


Fig. 3. Complex of ISS control tasks



trol systems can be built by limiting the following management tasks in the management system: ISS structure management, ISS security management and ISS resource management.

So the main control organ of the ISS is assigned to the whole spectrum of management tasks of the ISS of the ACS SPO: management of the operation of the whole ISS, management of the integrated ISS structure, management of the common ISS resource, global security management in the ISS is the global vector of management

$$\mathbf{U}_{IP} = \{\mathbf{U}_{IPFunc}, \mathbf{U}_{IPStr}, \mathbf{U}_{IPRes}, \mathbf{U}_{IPSec}\}.$$

The reserve control organ of the ISS is assigned a limited range of management tasks for the ISS of the ACS SPO: management of the operation of the entire ISS in the event of a failure of the main control organ and emergency situations, the control of the ISS structure is obviously significantly degraded due to significant destructive effects, management of the remaining ISS resource is a global vector management

$$\mathbf{U}_{IP}^{(G_I \Pi_U IPZap)} = \{\mathbf{U}_{IPFunc}, \mathbf{U}_{IPStr}, \mathbf{U}_{IPRes}\}.$$

At the control organ of the ISS services are entrusted with a varied set of management tasks aimed at ensuring the operation of information services, incl. in emergency situations: either the management of the service structure, the management of service resources — the local control vector

$$\mathbf{U}_{IP}^{(\Pi_U ServIP)} = \{\mathbf{U}_{IPStr}^{Serv}, \mathbf{U}_{IPRes}^{Serv}\},$$

or only management of the service structure — the local control vector

$$\mathbf{U}_{IP}^{(\Pi_U ServIP)} = \{\mathbf{U}_{IPStr}^{Serv}\},$$

or only management of service resources — the local control vector

$$\mathbf{U}_{IP}^{(\Pi_U ServIP)} = \{\mathbf{U}_{IPRes}^{Serv}\}.$$

At the control organ of the ISS of the ACS SPO security entrusts a set of management tasks aimed at the uninterrupted functioning of the security system of the ISS in various operating conditions (including in emergency situations)[1]: managing security incidents, managing security risks, managing security policies, managing security tools of the ISS — control vector

$$\mathbf{U}_{IP}^{(\Pi_U SecIP)} = \{\mathbf{U}_{IPSec}\} = \{\mathbf{U}_{IPSec}^{inc}, \mathbf{U}_{IPSec}^{risk}, \mathbf{U}_{IPSec}^{pol}, \mathbf{U}_{IPSec}^{div}\}.$$

## CONCLUSION

Thus, in accordance with the system approach to the organization of the ISS of the ACS SPO management on the basis of the formalized description of the ISS, a vector is formed

$$\mathbf{S}_{IP}(t) = [s_1(t), \dots, s_i(t), \dots, s_n(t)],$$

describing the state of the information subsystem of the ASN ACS at an arbitrary moment of time. As a result of the observation of the ISS of the ACS SPO, the vector  $\mathbf{S}_{IP}(t)$  is estimated from the observed vector

$$\mathbf{X}_{IP}(t) = [x_1(t), \dots, x_i(t), \dots, x_n(t)]$$

with obtaining values of the vector

$$\bar{\mathbf{S}}_{IP}(t) = [\bar{s}_1(t), \dots, \bar{s}_i(t), \dots, \bar{s}_n(t)],$$

which, in accordance with the management objectives  $\mathbf{C}_{IP} = (c_{IP1}, \dots, c_{IPp})$ , is then used by the control system to form a control vector

$$\mathbf{U}_{IP}(T^i_u) = \{\mathbf{U}_{IPFunc}(T^i_u), \mathbf{U}_{IPStr}(T^i_u), \mathbf{U}_{IPRes}(T^i_u), \mathbf{U}_{IPSec}(T^i_u)\}$$

for each control interval <<LEqnm0092.eps>>.

In accordance with the hierarchy of architecture and the organizational structure of the control system of the ISS of the ACS SPO management vector

$$\mathbf{U}_{IP}(T^i_u) = \{\mathbf{U}_{IPFunc}(T^i_u), \mathbf{U}_{IPStr}(T^i_u), \mathbf{U}_{IPRes}(T^i_u), \mathbf{U}_{IPSec}(T^i_u)\}$$

is decomposed into control vectors:

— for the main control organ of the ISS of the ACS SPO

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{IP}^{(G_I \Pi_U IP)}(T^i_u) &= \\ &= \{\mathbf{U}_{IPFunc}^{(G_I \Pi_U IP)}(T^i_u), \mathbf{U}_{IPStr}^{(G_I \Pi_U IP)}(T^i_u), \mathbf{U}_{IPRes}^{(G_I \Pi_U IP)}(T^i_u), \mathbf{U}_{IPSec}^{(G_I \Pi_U IP)}(T^i_u)\}; \end{aligned}$$

— for reserve control organ of the ISS of the ACS SPO

$$\mathbf{U}_{IP}^{(\Pi_U Zap)}(T^i_u) = \{\mathbf{U}_{IPFunc}^{(\Pi_U Zap)}(T^i_u), \mathbf{U}_{IPStr}^{(\Pi_U Zap)}(T^i_u), \mathbf{U}_{IPRes}^{(\Pi_U Zap)}(T^i_u)\};$$

— for each service control organ of the ISS of the ACS SPO

$$\mathbf{U}_{IP}^{(\Pi_U Serv)}(T^i_u) = \{\mathbf{U}_{IPStr}^{(\Pi_U Serv)}(T^i_u), \mathbf{U}_{IPRes}^{(\Pi_U Serv)}(T^i_u)\},$$

or  $\mathbf{U}_{IP}^{(\Pi_U Serv)}(T^i_u) = \{\mathbf{U}_{IPStr}^{(\Pi_U Serv)}(T^i_u)\},$

or  $\mathbf{U}_{IP}^{(\Pi_u, Serv)}(T_u^i) = \{\mathbf{U}_{IPRes}^{(\Pi_u, Serv)}(T_u^i)\};$

for security control organ of the ISS of the ACS SPO

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{IP}^{(\Pi_u, SecIP)}(T_u^i) = \\ = \{\mathbf{U}_{IPSec}^{inc}(T_u^i), \mathbf{U}_{IPSec}^{risk}(T_u^i), \mathbf{U}_{IPSec}^{pol}(T_u^i), \mathbf{U}_{IPSec}^{div}(T_u^i)\}. \end{aligned}$$

In this case, the specific implementation of global, functional and local control vectors obtained as a result of the decomposition of the control vector of the ISS

$$\mathbf{U}_{IP}(T_u^i) = \{\mathbf{U}_{IPFunc}(T_u^i), \mathbf{U}_{IPStr}(T_u^i), \mathbf{U}_{IPRes}(T_u^i), \mathbf{U}_{IPSec}(T_u^i)\},$$

will be determined by the methods used to manage the operation of the ISS, manage the ISS structure, manage the ISS resources, manage the safety of the ISS of the ACS.

## References

1. Burenin A.N., Kurnosov V.I. *Teoreticheskie osnovy upravleniya sovremennymi telekommunikacionnymi setyami* [Theoretical bases of management of modern telecommunication networks]. Moscow: Nauka. 2011. 464 p. (In Russian)
2. Burenin A.N., Legkov K.E. *Sovremennye infokommunikatsionnye sistemy i seti spetsial'nogo naznacheniya. Osnovy postroeniya i upravleniya: Monografiya*. [Modern infocommunication systems and special purpose networks. Basics of creation and control]. Moscow, Media Publisher, 2015. 348 p. (In Russian)
3. Bellman R., Gliksberg I., Gross O. *Nekotoryye voprosy matematicheskoy teorii protsessov upravleniya* [Some questions of the mathematical theory of control processes]. Moscow: Izdatelstvo inostrannoy literaturi. 1962. 336 p. (In Russian)
4. Norbert Wiener. *Kibernetika ili upravleniye i svyaz' v zhivotnom i mashine* [Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine]. Moscow: Sovetskoe radio. 1968. 325 p. (In Russian)
5. Kolmogorov A.N., Fomin S.V. *Elementy teorii funktsiy i funktsional'nogo analiza* [Elements of the theory of functions and functional analysis]. Moscow: Nauka. 1968. 506 p. (In Russian)
6. Pontryagin L. S. and others. *Matematicheskaya teoriya optimal'nykh protsessov* [Mathematical theory of optimal processes]. Moscow: Nauka. P. 238. (In Russian)
7. Ralfa G. *Analiz resheniy. Vvedenie v problemu vybora v usloviyah neopredelennosti* [Analysis of decisions. Introduction in a choice problem in the conditions of uncertainty]. Moscow: Nauka. 1977. 408 p. (In Russian)
8. Ventcel E. S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. Moscow: Nauka. 1974. 542 p. (In Russian)
9. Trener D. *Veroyatnost', statistika i issledovanie operatsiy* [Probability, statistics and research of operations]. Moscow: Statistika. 1976. 387 p. (In Russian)
10. Lanne A.A., Ulakhovich D.A. *Mnogokriterialnaya optimizatsiya* [Multi-criteria optimization]. Leningrad: VAS, 1984. 87 p. (In Russian)
11. Bower J.L. The role of conflict in economic decision making groups, some empirical result. *The Quarterly Journal of Economics*. 1965. Vol. 79. No. 2. Pp. 424–444.
12. Zaharov G.P. *Metody nabludeniya za set'u peredachi dannykh* [The methods of observation of the data transmission networks]. Moscow: Radio and communication. 1982. 208 p. (In Russian)
13. Satovsky B.L. *Upravlenie kaestvom obsluzhivaniya v multiservisnykh setyakh obshchego pol'zovaniya* [Quality of service management in multiservice networks of general use] *Vestnik svyazi* [Messenger of communication]. 1999. No. 4. (In Russian)
14. Novikov S.N. Classification of routing methods in multiservice communication networks. *Vestnik SibGUTI*. 2013. No. 1. Pp. 57–67. (In Russian)
15. Avanesov M. Y., Prisyazhnyuk S. P. *Operativnoe upravlenie potokami dannykh v multiservisnykh setyakh svyazi* [Data flow operational control in multiservice communication networks]. Saint-Petersburg: Baltic State Tech. University., 2007. 81 p. (In Russian)
16. Lazarev V.G., Savvin N.G. *Seti svyazi, upravlenie, kommutatsiya* [Communication networks, control, switching]. Moscow: Svyaz'. 1973. 264 p. (In Russian)

## СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ОРГАНИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫМИ ПОДСИСТЕМАМИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

**ЛЕГКОВ Константин Евгеньевич,**

г. Санкт-Петербург, Россия, constl@mail.ru

**ЛЕВКО Игорь Владимирович,**

г. Санкт-Петербург, Россия, konferencia\_asu\_vka@mail.ru

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** системный подход; автоматизированная система управления; информационная подсистема; процессы управления; целенаправленный процесс.

### АННОТАЦИЯ

Функционирование разнообразных современных сложных объектов специального назначения с высокими показателями качества возможно только при организации эффективного управления ими, которое реализуется посредством автоматизированных систем управления. В самих системах управления поддержание непрерывности и необходимого уровня показателей качества процессов управления сложным объектом специального назначения обеспечивается, в том числе, за счет создания информационной подсистемы, которая обеспечивает должностным лицам органов управления и комплексам технических средств автоматизированных систем управления получение требуемой номенклатуры информационных услуг, обеспечивающих принятие обоснованных правильных решений по организации управления. Вместе с тем, информационная подсистема, как сложная система, также должна управляться, для чего, как правило, создается выделенная система управления, на которую возлагается решение ряда задач управления, номенклатура которых определяется целями подсистемы, а их

содержание – теми методами управления, которые заложены в специальном программном обеспечении комплексов технических средств.

Цели управления информационной подсистемой в полной мере никогда не будут достигнуты, так как для формирования и реализации управления требуется время, за которое информационная подсистема изменится непредвиденным образом, в результате чего управление ею наверняка не приведет к строго желаемому результату. Основным способом преодоления этого является экстраполяция поведения информационной подсистемы с выявлением направления эволюции всех ее компонент.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Легков К. Е., к.т.н., начальник кафедры автоматизированных систем управления Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского;

Левко И. В., к.т.н., доцент, доцент кафедры автоматизированных систем управления Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского.

---

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Легков К.Е., Левко И.В. Системный подход к организации управления информационными подсистемами автоматизированных систем управления сложными объектами специального назначения // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 5. С. 84-91.

# TO A QUESTION OF INCREASING THE DATA TRANSMISSION RATE OF PHASE RADIO-TECHNICAL DATA TRANSMISSION SYSTEMS OPERATING UNDER STRONG INTERSYMBOL INTERFERENCE IN LINEAR RADIO PATH

**LERNER**

**Ilya Mikhaylovich<sup>1</sup>**

**KAMALLETDINOV**

**Nail Nadyrovich<sup>2</sup>**

---

<sup>1</sup>PhD, Associated Professor of Kazan National Research Technical University n.a. A.N. Tupolev - KAI, Kazan, Russia, aviap@mail.ru

<sup>2</sup>PhD, Associated Professor of Kazan National Research Technical University n.a. A.N. Tupolev - KAI, Kazan, Russia, kamal585@mail.ru

**KEYWORDS:** PSK- $n$ -signal; bandpass filters; increasing data transfer rate; frequency detuning; radio engineering data transmission systems.

**ABSTRACT**

Volume of information transmitted by radio engineering data transmission systems exponentially increasing from year to year is a current trend of modern society. This leads to considerable problem of creating new systems capable to operate under conditions of constantly increasing requirements to an effective frequency resource usage.

One of the most effective approaches to solving this problem is the conversion to data transmission in the presence of intersymbol interference produced by the presence of linear selective systems in radio engineering data transmission systems. However, the attractiveness of this approach is associated with an increase of complexity of the receiver itself along with an increase of number of interfering symbols. This ultimately arises the issue not only about the expediency of its implementation, but also about its practical feasibility.

In this paper, the issue of increasing the data transfer rate in radio engineering data transmission systems is discussed, in which the suppression of intersymbol interference in linear selective systems of a linear radio path is not performed, and the correctness of the reconstruction of the transmitted information sequence is achieved due to the appropriate selection of resolving time. It is shown that in some cases for large values of the volume of alphabet of channel symbols, the resolving time can be significantly reduced in the case when bandpass filters are used as linear selective systems.

---

**FOR CITATION:** Lerner I. M., Kamalletdinov N. N. To a question of increasing the data transmission rate of phase radio-technical data transmission systems operating under strong intersymbol interference in linear radio path. *H&ES Research*. 2017. Vol. 9. No. 5. Pp. 92-104.

Volume of information transmitted by radio engineering data transmission systems (RDTS) exponentially increasing from year to year is a current trend of modern society. This leads to considerable problem of creating new RDTS capable to operate under conditions of constantly increasing requirements to an effective frequency resource usage [1–4].

One of the most effective approaches to solving this problem is the conversion to data transmission in the presence of intersymbol interference (ISI) produced by the presence of linear selective systems (LSS) in RDTS. However, the attractiveness of this approach is associated with an increase of complexity of the receiver itself along with an increase of number of interfering symbols. This ultimately arises the issue not only about the expediency of its implementation, but also about its practical feasibility.

This feature is most pronounced among algorithms using the maximum likelihood criterion – optimal algorithms of signal receiving in the presence of ISI [1]. Computational complexity of such algorithms increases exponentially, both with an increase in the number of interfering symbols (which occurs with increasing the transmission rate) and with increasing the volume of the alphabet of channel symbols [5–10].

At the same time, the application of methods with a low computational complexity (zero-forcing filter, linear minimum squared estimation equalizer and decision feedback equalizer) reducing ISI level, which allows to perform the consequent signal processing in the absence of communication channel memory [1], are also not without drawbacks [11]. The common disadvantage of all methods mentioned above is their low noise immunity as compared to algorithms using the maximum likelihood criterion and dependence of their noise immunity on shape of amplitude frequency response (AFR) of communication channel [1, 11]. The last feature is the most pronounced in case when AFR is subjected to considerable variations on magnitude in entire frequency range what is typical for AFR of radio channels [1, 11].

Since all the methods listed above don't provide the complete suppression of ISI and don't allow achieving high noise immunity, then it makes sense to consider the operation features of RDTS, which provide receiving and processing of signals in the presence of ISI without its compensation. In this case the reliable signal receiving ensured by the correct choice of resolution time of LSS of RDTS [4, 12–13].

RDTS using multi-position phase-shift keying signals with  $n$  discrete states (PSK- $n$ -signals) are the most widely spread nowadays. So it is reasonable to examine the operation features of RDTS of this class specifically for PSK- $n$ -signals.

At the same time it is expedient to estimate the operation features of such RDTS using error probability per channel symbol and induced ISI, depending on channel symbol time duration, since it is the second of the most important characteristics of such RDTS along with capacity which was considered in paper [4].

## I. PROBLEM STATEMENT

Since we are primarily concerned with the effect of ISI on error probability, we assume that there is no noise in the communication channel. And the communication channel, for which we estimate error probability per channel symbol when receiving the data of message, consists of a transmitter, LSS, a receiver and a decision device (DD).

In this paper let's confine ourselves to considering the LSS as a population of equitype linear bandpass filters, which satisfy the following conditions:  $\omega_0/2\Delta\Omega_0 \geq 15$ , where  $2\Delta\Omega_0$  — is the resultant bandwidth of LSS, where  $\omega_0$  — is an average frequency of the LSS; and their amplitude-frequency and phase-frequency responses possess even and odd symmetry with respect to. We assume that the receiver is an ideal phase detector and, similarly to DD, doesn't introduce additional ISI to ones formed with LSS.

Each symbol of primary signal that impacts on the input of transmitter takes equiprobably one of  $n$  phase values of the signal constellation:

$$\psi_k = (k + \nu \text{sign}(\|0.5n\| - 0.5n - 0.25) - \|0.5n\|) \Delta\varphi_{st} \quad (1)$$

Here  $k = \overline{1, n}$ ;  $\| \cdot \|$  — rounding operation to the nearest integer;  $\text{sign}(\cdot)$  — signum function;  $\Delta\varphi_{st} = 2\pi/n$  — step between adjacent phase values of the signal constellation;  $\nu \in [0; 0.5]$  parameter defines the initial phase shift of signal constellation  $\varphi_{sc} = 2\pi\nu/n$ .

The PSK- $n$ -signal generated by the transmitter from the moment  $t = 0$  can be represented as follows

$$\begin{aligned} \dot{s}_{in}(t) = & \sum_{r=1}^l [1(t - (r-1)\tau_s) - 1(t - r\tau_s)] \times \\ & \times \exp(j((\omega_0 + \Delta\omega)t + 2\theta_r + \vartheta_r - \varphi_0)) = \sum_{r=1}^l [1(t - (r-1)\tau_s) - \\ & - 1(t - r\tau_s)] \exp(j((\omega_0 + \Delta\omega)t + \psi((r-1)\tau_s) - \varphi_0)), \end{aligned} \quad (2)$$

where  $l \in \mathbb{N}^*$  — is the number of transmitted radio pulses of the PSK- $n$ -signal;

$\tau_s$  — transmission time of each radio pulse of the PSK- $n$ -signal (symbol time duration);

$$1(t) — \text{Heaviside step function; } \vartheta_r = \sum_{q=1}^{r-1} 2\theta_q + \varphi_{sc};$$

$\omega_0 + \Delta\omega$  — the carrier frequency of the PSK- $n$ -signal, where  $\Delta\omega$  — frequency detuning;

$\varphi_0$  — resultant constant phase shift introduced by LSS on frequency  $\omega_0 + \Delta\omega$ ;

$2\theta_r = \psi((r-1)\tau_s) - \psi((r-2)\tau_s)$  — phase jump caused by the transmission of  $r$ -th radio pulse, where  $\psi((r-1)\tau_s) = 2\theta_r + \vartheta_r$  and  $\psi((r-2)\tau_s) = 2\theta_{r-1} + \vartheta_{r-1}$  — are initial phases of  $r$ -th and  $(r-1)$ -th radio pulses of PSK- $n$ -signal at the output of transmitter. If  $r = 1$  the initial phase is  $\psi((r-2)\tau_s) = \varphi_{sc}$ , because we assume that until

the time  $t = 0$  LSS is in a steady state and transmitter generates the harmonic oscillation  $\exp(j((\omega_0 + \Delta\omega)\tau + \varphi_{sc} - \varphi_0))$ .

In this case PSK- $n$ -signal at the output of a LSS starting from the time  $t = 0$  according to results of [14] and superposition principle can be represented as follows

$$\begin{aligned} \dot{s}_{out}(t) &= \dot{k}_0(j(\omega_0 + \Delta\omega))\dot{Z}(t)\exp(j((\omega_0 + \Delta\omega)t - \varphi_0)) = \\ &= \dot{k}_0(j(\omega_0 + \Delta\omega))\exp(j((\omega_0 + \Delta\omega)t - \varphi_0))(\exp(j(\xi_1 - \theta_1)) + \\ &\quad + \sum_{r=1}^l \lambda_r [\exp(j(\xi_r + \theta_r)) - \exp(j(\xi_r - \theta_r))]), \end{aligned} \quad (3)$$

where  $\dot{Z}(t)$  — is the complex envelope of the PSK- $n$ -signal at LSS output;

$$\lambda_r = 1(t - (r-1)\tau_s)\dot{B}_0(t - (r-1)\tau_s, \Delta\omega);$$

$\dot{B}_0(t, \Delta\omega)$  — settling function for LSS [14];

$\dot{k}_0(j(\omega_0 + \Delta\omega)) = k(j(\omega_0 + \Delta\omega))\exp(j\varphi_0)$  — the resultant complex transmission coefficient of LSS on frequency  $\omega_0 + \Delta\omega$ ;

$$\xi_r = \sum_{q=1}^{r-1} 2\theta_q + \theta_r + \varphi_{sc} \quad (4)$$

On the output of phase detector the informative signal — the slowly varying phase of the PSK- $n$ -signal is defined according to (3) as

$$\begin{aligned} \psi_{me}(t) &= \arg \dot{Z}(t) = \arg [\exp(j(\xi_1 - \theta_1))] + \\ &+ \sum_{r=1}^l \lambda_r [\exp(j(\xi_r + \theta_r)) - \exp(j(\xi_r - \theta_r))]. \end{aligned} \quad (5)$$

The recovery of the primary signal is made by DD based on the decision rule

$$\psi_{rec}(r\tau_s) = \psi_k |_{k=k'}. \quad (6)$$

where  $k' \in \overline{1, n}$ :  $f(k', r) = \min_{k \in \overline{1, n}} |\psi_{me}(r\tau_s) - \psi_k| \leq \alpha_{pm}$ ;

$$\alpha_{pm} < 0.5\Delta\varphi_{st},$$

where  $\alpha_{pm}$  — is the permissible phase settling error on LSS output. The latter condition is required to ensure the uniqueness of DD solution in the absence of noise. The permissible error is related to measured settling error of slowly varying phase by the following expression  $\alpha_{pm} \geq |\alpha_{me}(r\tau_s)| = |\psi_{me}(r\tau_s) - \psi((r-1)\tau_s)|$  and determines the limiting value for the difference taken by modulus between the specified phase value of PSK- $n$ -signal radio pulse on LSS output and the initial phase value of the same radio pulse acting on its input.

The permissible error  $\alpha_{pm}$  is related to reduced permissible error  $\alpha_0$  by  $\alpha_0 = \alpha_{pm}/\Delta\varphi_{st}$  equation.  $\alpha_0$  should be chosen so that

$\alpha_0 \rightarrow 0.5$ , what allows to exploit the dynamic operation mode of the considered communication channel in full measure.

To define the operation features of the considered RDTs let's consider the following bandpass filters with identical bandwidth as a LSS:

1. One and two staged resonant filter. According to [14] the settling function of one staged filter is defined as

$$\dot{B}_0(x, \rho) = 1 - \exp(-x)(\cos \rho x - j \sin \rho x), \quad (7)$$

and the settling function of two staged filter is defined as

$$\dot{B}_0(x, \rho) = 1 - \exp(-x)(\cos \rho x - j \sin \rho x)(1 + (1 + j\rho)x), \quad (8)$$

where  $x = \Delta\Omega_0 t$  — non-dimensional time;

$\Delta\Omega_0 = \Delta\Omega_0/\alpha_\Delta$ ; for one staged resonant filter  $\alpha_\Delta = 1$  and for two staged —  $\alpha_\Delta = 0.644$ ;

$\rho = \Delta\omega / \Delta\Omega = \alpha_\Delta \Delta\omega / \Delta\Omega_0 = \rho_0 \alpha_\Delta$  — non-dimensional frequency detuning.

2. Single stage bandpass filter on coupled circuits with different values of a degree of circuit coupling. Settling function for a single stage filter is the following [14]:

$$\dot{B}_0(x, \rho) = 1 - \exp(-(1 + j\rho)x) \left( \cos \beta x + \frac{1 + j\rho}{\beta} \sin \beta x \right). \quad (9)$$

Here  $\alpha_\Delta = 1.414$  for a single stage filter with degree of circuit coupling  $\beta = 1$  and  $\alpha_\Delta = 3.11$  for degree of circuit coupling  $\beta = 2.41$ .

## I. PROBLEM SOLVING

Due to the validity of transposition principle for LSS and results of [4] it can be stated that the process of phase settling of PSK- $n$ -signal on LSS output, caused by the accidental essence of the emergence of initial phase values in the transmitted information sequence, is statistic stationary starting from the certain moment of time  $\tau_s$ , for any symbols starting from the 5-th. Thus, this allows us to estimate the probability of an error depending on symbol time duration in the presence of ISI for the whole sequence starting from the 5-th symbol.

This problem will be solved by numerical simulation, using expressions (1)–(9) — and the following relation for error probability:

$$\begin{aligned} P_{err}(\Delta\Omega_0\tau_s) &= \\ &= 1 - \frac{\sum_{m=1}^g 1(\alpha_{pm} - |\psi_{me}(r\tau_s, m) - \psi((r-1)\tau_s, m)|)}{g}, \end{aligned} \quad (10)$$

where  $\psi_{me}(r\tau_s, m)$  — value of slowly varying phase measured on LSS output at the end of the  $r$ -th radio pulse for the  $m$ -th realization of the transmitted information sequence;

$\psi((r-1)\tau_s, m)$  — initial phase value of the  $r$ -th radio pulse for the  $m$ -th realization of the transmitted information sequence;

$g$  — the quantity of realization of information sequence.

First of all the time  $\tau_s$  is initially determined from which the differences between the dependencies of the integral distribution function for measured error for all symbols starting from the 5th do not exceed 5%, when the expression (10) is used.

For the rest first four symbols of the sequence, error probability is defined according to the following relation

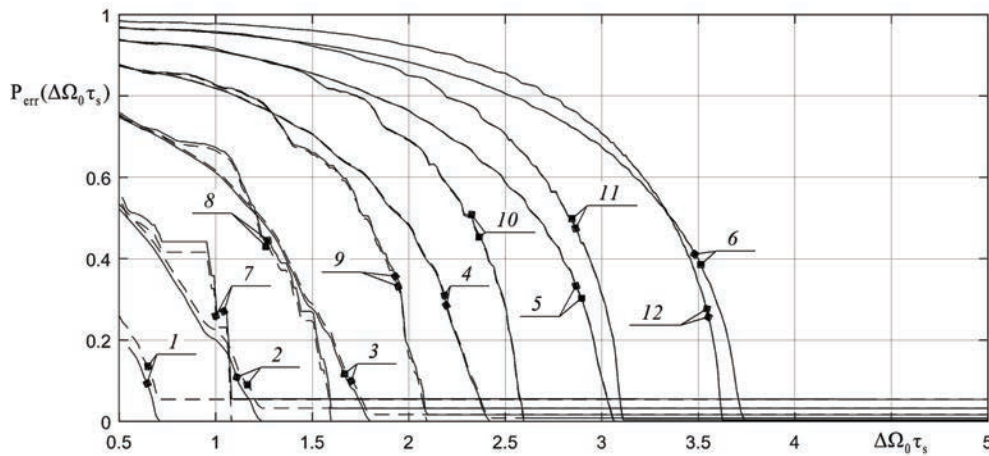
$$P'_{err}(\Delta\Omega_0\tau_s, f) = \frac{\sum_{m=1}^g 1(\alpha_{pm} - |\psi_{me}(f\tau_s, m) - \psi((f-1)\tau_s, m)|)}{g},$$

where  $\psi_{me}(f\tau_s, m)$  — value of slowly varying phase measured on LSS output at the end of the  $f$ -th radio pulse for the  $m$ -th realization of the transmitted information sequence;

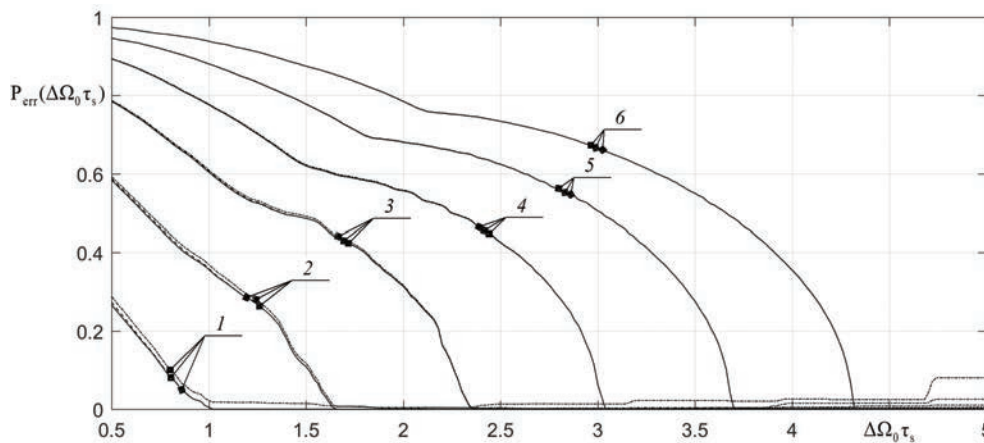
$\psi((f-1)\tau_s, m)$  — initial phase value of the  $f$ -th radio pulse for the  $m$ -th realization of the transmitted information sequence.

The following parameters were used in the process of numerical simulation: number of transmitted radio pulses  $l = 30$ ; number of realizations of PSK- $n$ -signal  $g = 5 \times 10^4$ ; number of discrete states was  $n = 4, 8, 16, 32, 64, 128$  with initial shift of the signal constellation  $\varphi_{sc} = \{0; 0.5\pi/n; \pi/n\}$ ; the value of reduced permissible error  $\alpha_0$  was 0.4999;  $r = 9$ .

Results of numerical simulation for single- and two staged resonant filter are presented on (fig. 1–9)



**Fig.1.** Error probability per channel symbol depending on channel symbol time duration in the presence of ISI at the LSS output. LSS: tuned single-stage resonant filter (1–6); tuned two-stage resonant filter (7–12). Initial phase shift of PSK- $n$ -signal  $\varphi_{sc} : \pi/n$  (solid line); 0 (dashed line). Number of discrete states  $n$ : 4 (1,7); 8 (2,8); 16 (3,9); 32 (4,10); 64 (5,11); 128 (6,12).



**Fig.2.** Error probability per channel symbol depending on channel symbol time duration in the presence of ISI at the LSS output. LSS: single-stage resonant filter. Non-dimensional frequency detuning  $\rho_0 = -0.5$ . Initial phase shift of PSK- $n$ -signal  $\varphi_{sc} : \pi/n$  (solid line);  $0.5\pi/n$  (dashed line); 0 (dot-dashed line). Number of discrete states  $n$ : 4 (1); 8 (2); 16 (3); 32 (4); 64 (5); 128 (6).

Analyzing dependencies of error probability for resonant filters (fig. 1–9), we can make the following conclusions:

1. The presence of frequency detuning leads to an increase in the resolving time of the resonance filters. At the same time, the degree of increase is more pronounced, the higher the values of frequency detuning.

2. The best signal constellation with an even number of discrete states, ensuring the absence of a constant error during PSK- $n$ -signals receiving and processing in the presence of ISI is that whose  $\varphi_{sc} = \pi/n$ .

3. The presence of frequency detuning doesn't lead to change of configuration of resolving time relations between different PSK- $n$ -signals relatively to case of the absence of frequency detuning.

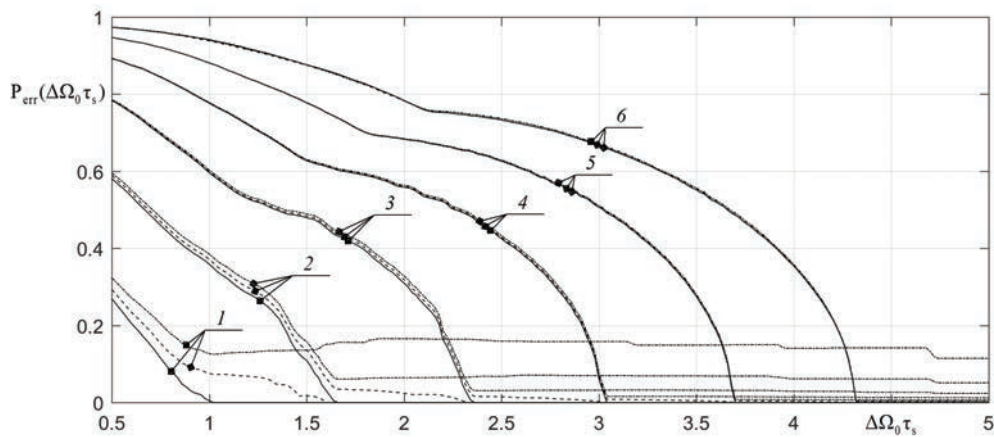
4. Changes in error probability with positive values of frequency detuning for PSK- $n$ -signals considered in this paper,

when the value of initial phase shift of signal constellation differs from  $\varphi_{sc} = \pi/n$  is more pronounced as compared to the case when it takes negative values.

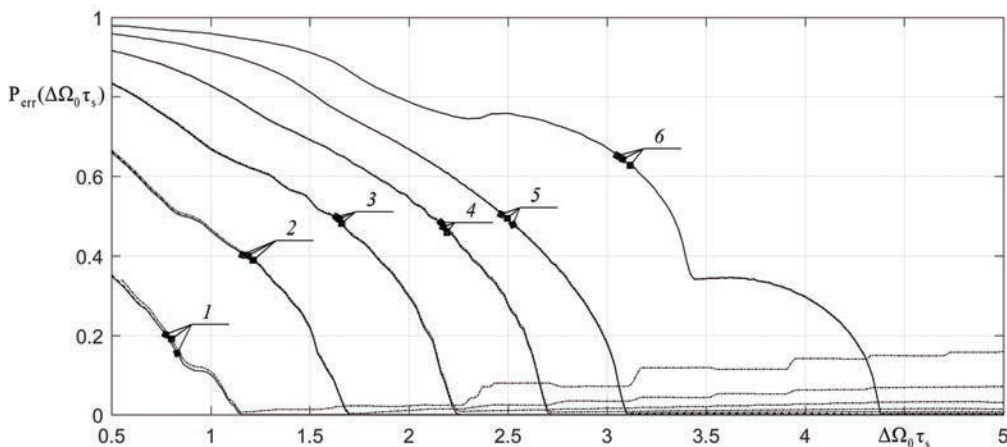
Results of numerical simulation for single stage bandpass filter on coupled circuits with different values of a degree of circuit coupling are presented on (fig. 10–19).

Analyzing dependencies of error probability for bandpass filter (fig. 10–19), we can make the following conclusions in addition to those that were made above for resonance filters:

1. Unlike resonant filters, the dependence of the error probability of symbol reception caused by ISI contains additional “transparency windows” at which it is zero, which allows to increase the transmission rate of PSK- $n$ -signals. In the absence of frequency detuning the degree of manifestation of this property increases (a decrease in the value of the number of discrete states occurs when this effect is manifested) with an

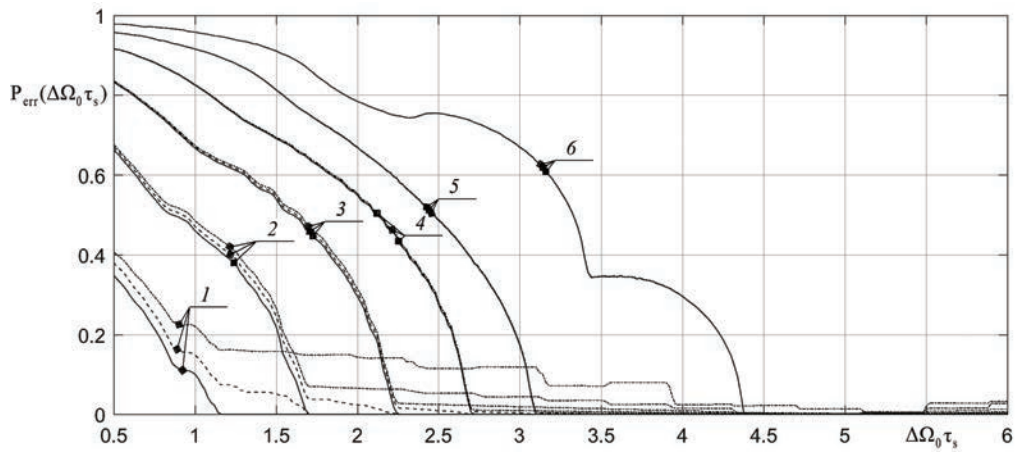


**Fig. 3.** Error probability per channel symbol depending on channel symbol time duration in the presence of ISI at the LSS output. LSS: single-stage resonant filter. Non-dimensional frequency detuning  $\rho_0 = 0.5$ . Initial phase shift of PSK- $n$ -signal  $\varphi_{sc} : \pi/n$  (solid line);  $0.5\pi/n$  (dashed line);  $0$  (dot-dashed line). Number of discrete states  $n$ : 4 (1); 8 (2); 16 (3); 32 (4); 64 (5); 128 (6).

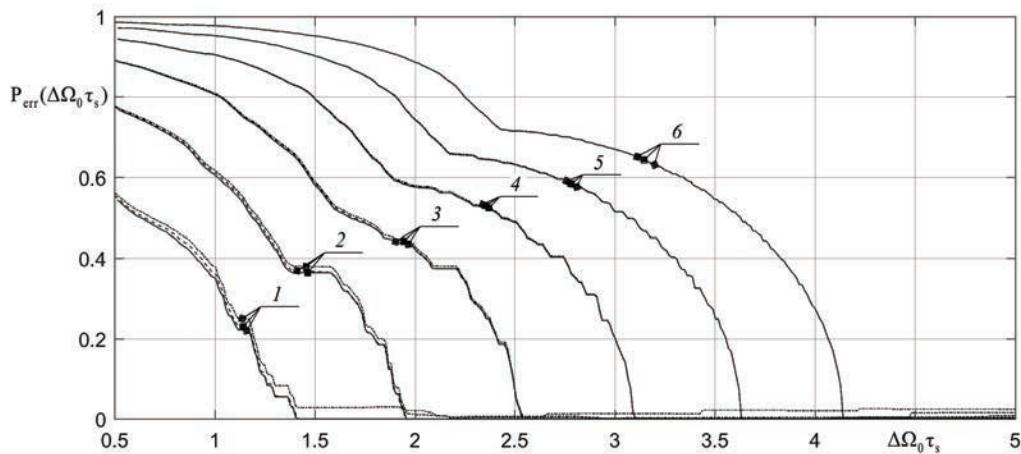


**Fig. 4.** Error probability per channel symbol depending on channel symbol time duration in the presence of ISI at the LSS output. LSS: single-stage resonant filter. Non-dimensional frequency detuning  $\rho_0 = -1$ . Initial phase shift of PSK- $n$ -signal.  $\varphi_{sc} : \pi/n$  (solid line);  $0.5\pi/n$  (dashed line);  $0$  (dot-dashed line). Number of discrete states  $n$ : 4 (1); 8 (2); 16 (3); 32 (4); 64 (5); 128 (6).

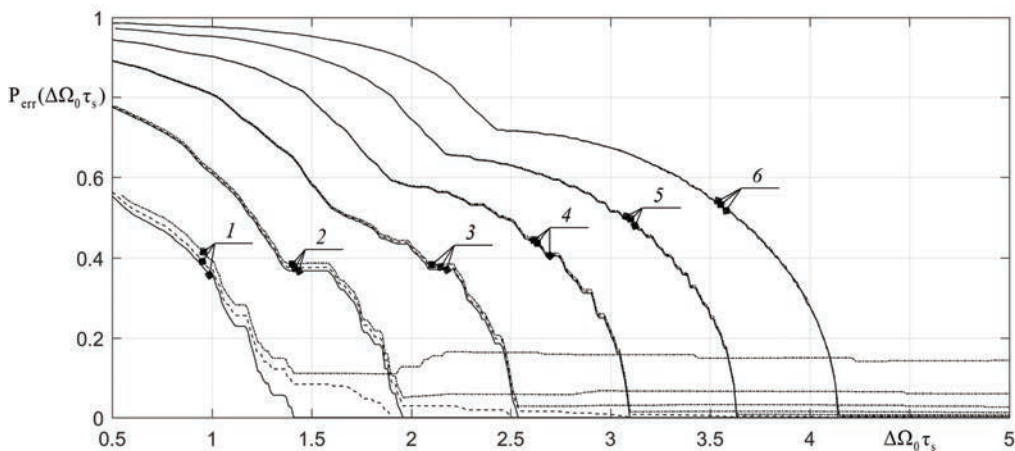




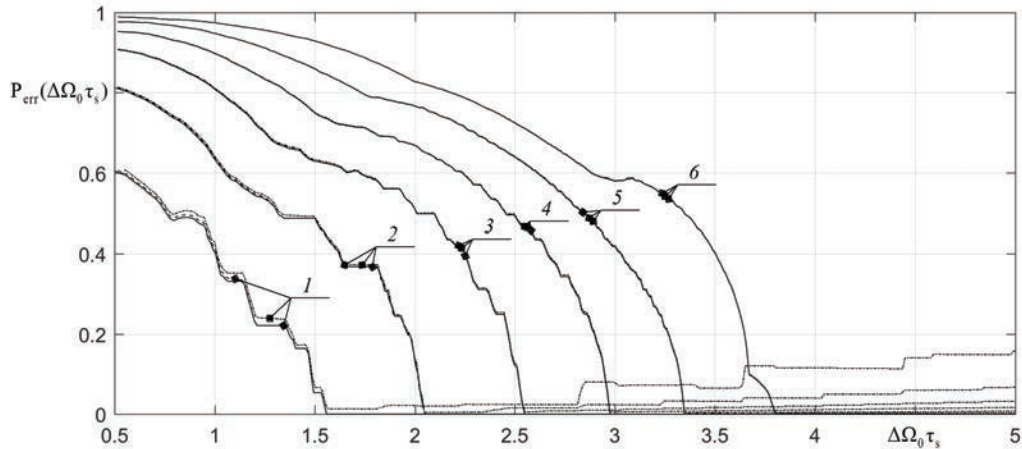
**Fig. 5.** Error probability per channel symbol depending on channel symbol time duration in the presence of ISI at the LSS output. LSS: single-stage resonant filter. Non-dimensional frequency detuning  $\rho_0 = 1$ . Initial phase shift of PSK- $n$ -signal  $\varphi_{sc} : \pi/n$  (solid line);  $0.5\pi/n$  (dashed line); 0 (dot-dashed line). Number of discrete states  $n$ : 4 (1); 8 (2); 16 (3); 32 (4); 64 (5); 128 (6).



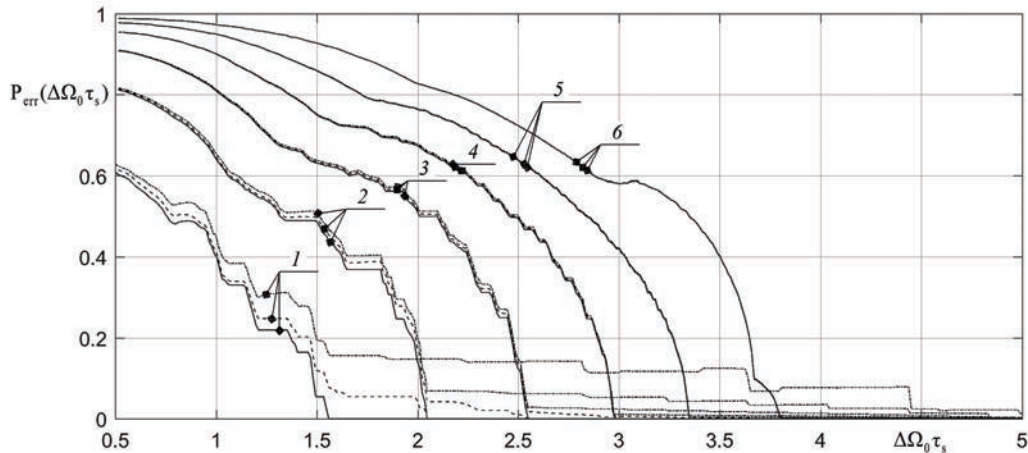
**Fig. 6.** Error probability per channel symbol depending on channel symbol time duration in the presence of ISI at the LSS output. LSS: two-stage resonant filter. Non-dimensional frequency detuning  $\rho_0 = -0.5$ . Initial phase shift of PSK- $n$ -signal  $\varphi_{sc} : \pi/n$  (solid line);  $0.5\pi/n$  (dashed line); 0 (dot-dashed line). Number of discrete states  $n$ : 4 (1); 8 (2); 16 (3); 32 (4); 64 (5); 128 (6).



**Fig. 7.** Error probability per channel symbol depending on channel symbol time duration in the presence of ISI at the LSS output. LSS: two-stage resonant filter. Non-dimensional frequency detuning  $\rho_0 = 0.5$ . Initial phase shift of PSK- $n$ -signal  $\varphi_{sc} : \pi/n$  (solid line);  $0.5\pi/n$  (dashed line); 0 (dot-dashed line). Number of discrete states  $n$ : 4 (1); 8 (2); 16 (3); 32 (4); 64 (5); 128 (6).



**Fig. 8.** Error probability per channel symbol depending on channel symbol time duration in the presence of ISI at the LSS output. LSS: two-stage resonant filter. Non-dimensional frequency detuning  $\rho_0 = -1$ . Initial phase shift of PSK- $n$ -signal  $\varphi_{sc} : \pi/n$  (solid line);  $0.5\pi/n$  (dashed line);  $0$  (dot-dashed line). Number of discrete states  $n$ : 4 (1); 8 (2); 16 (3); 32 (4); 64 (5); 128 (6).



**Fig. 9.** Error probability per channel symbol depending on channel symbol time duration in the presence of ISI at the LSS output. LSS: two-stage resonant filter. Non-dimensional frequency detuning  $\rho_0 = 1$ . Initial phase shift of PSK- $n$ -signal  $\varphi_{sc} : \pi/n$  (solid line);  $0.5\pi/n$  (dashed line);  $0$  (dot-dashed line). Number of discrete states  $n$ : 4 (1); 8 (2); 16 (3); 32 (4); 64 (5); 128 (6).

increase of irregularity of AFR of passband, but it persists even in the absence of irregularity.

2. For small values of the frequency detuning ( $|\rho_0| \leq 0.5$ ) “transparency windows” of dependence of error probability in general are preserved, however, changing the conditions of their manifestation and decreasing their sizes (the decrease in the time interval at which they appear) are observed. At large values of frequency detuning or degree of circuit coupling ( $\beta = 2.41$ ) the absence of “transparency windows” is observed for considered PSK- $n$ -signals.

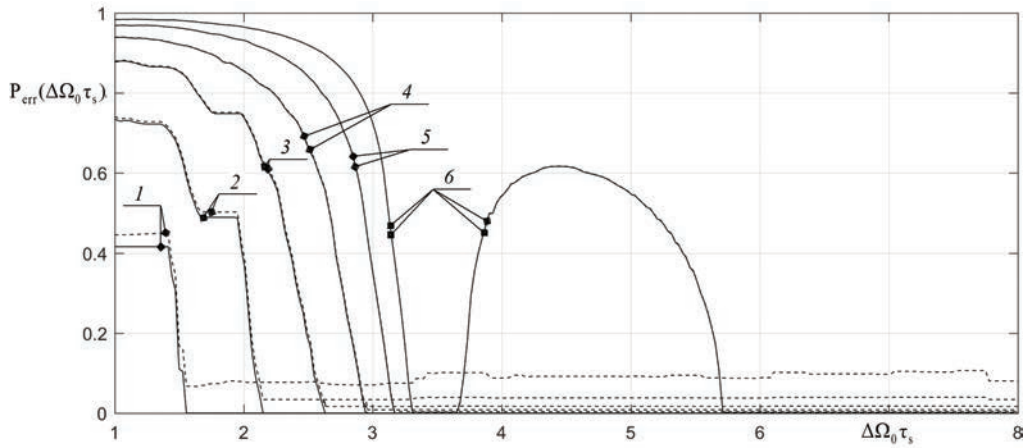
3. Changes in error probability with positive values of frequency detuning for PSK- $n$ -signals considered in this paper, when the value of initial phase shift of signal constellation differs from  $\varphi_{sc} = \pi/n$  is more pronounced as compared to the

case when it takes negative values when value of frequency detuning is large ( $|\rho_0| > 0.5$ ). For small values of frequency detuning, the opposite is true.

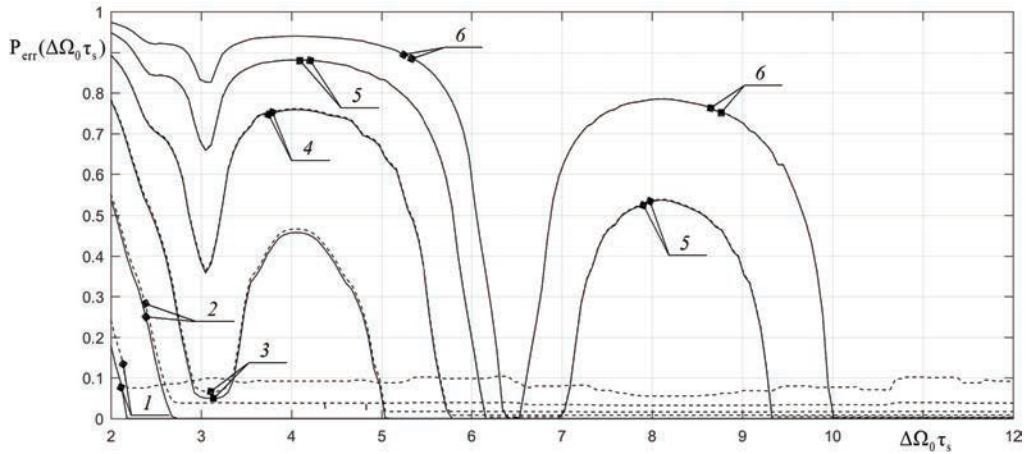
Results of numerical simulation for first four symbols are presented for tuned single stage bandpass filter on coupled circuits (fig. 20, 21). From figures, it follows that dependence of error probability for transmission of the first four symbols does not affect on the choice of resolving time. For resonant filters we can conclude the same according to the results [15].

## CONCLUSION

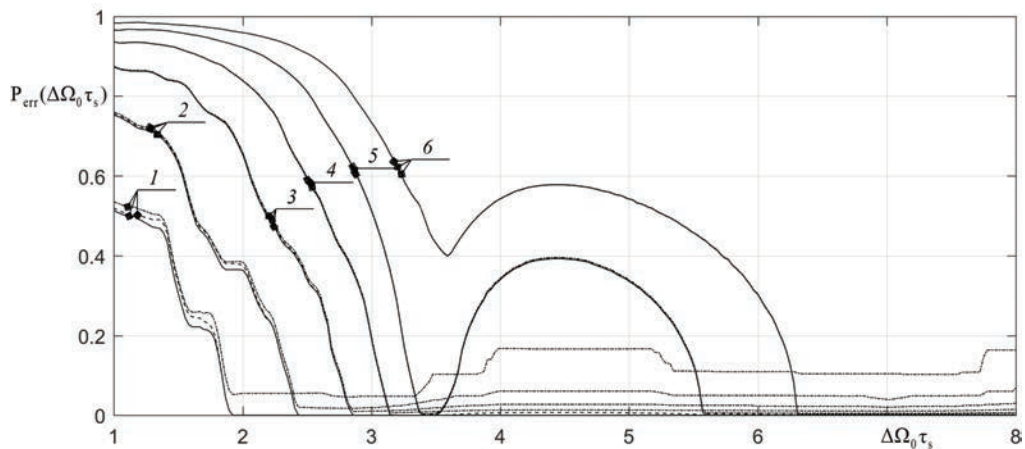
1. When LSS is a bandpass filter, the dependence of the error probability of symbol reception caused by ISI contains



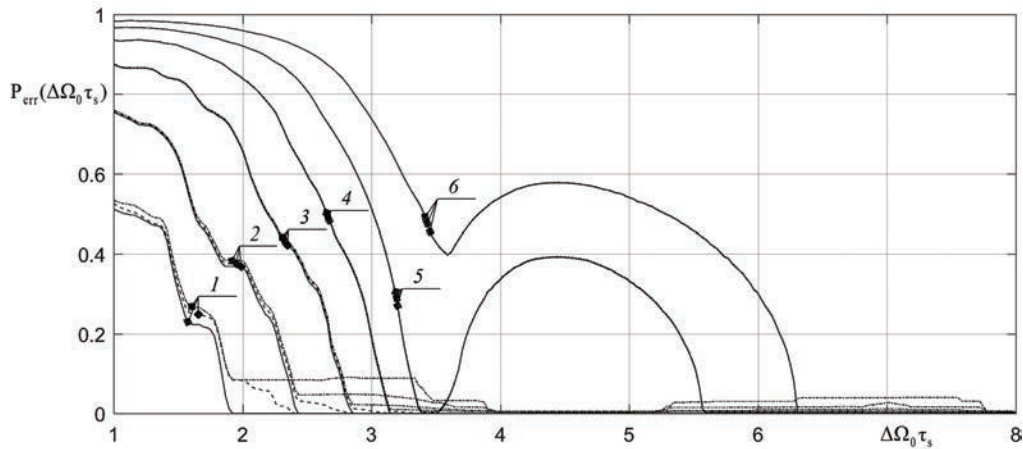
**Fig. 10.** Error probability per channel symbol depending on channel symbol time duration in the presence of ISI at the LSS output. LSS: tuned single stage bandpass filter on coupled circuits with degree of circuit coupling  $\beta = 1$ . initial phase shift of PSK- $n$ -signal  $\varphi_{sc} : \pi / n$  (solid line);  $0$  (dot-dashed line). Number of discrete states  $n$ : 4 (1); 8 (2); 16 (3); 32 (4); 64 (5); 128 (6).



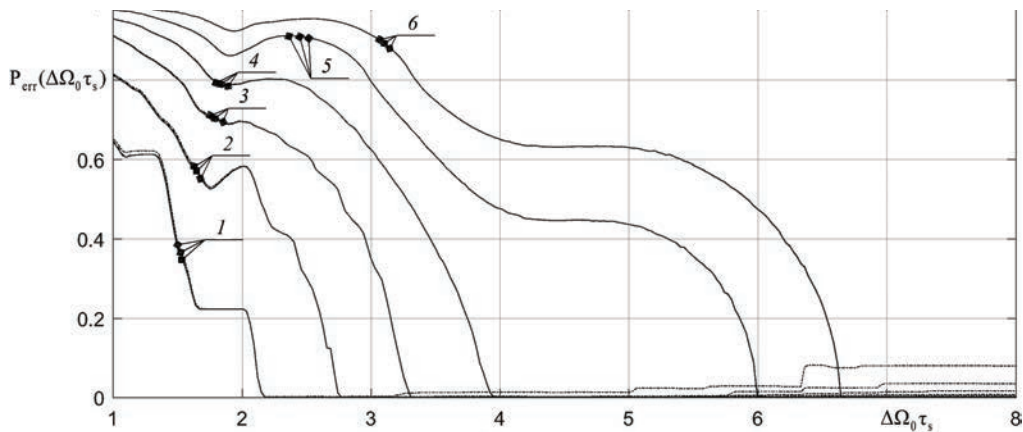
**Fig. 11.** Error probability per channel symbol depending on channel symbol time duration in the presence of ISI at the LSS output. LSS: tuned single stage bandpass filter on coupled circuits with degree of circuit coupling  $\beta = 2.41$ . Initial phase shift of PSK- $n$ -signal  $\varphi_{sc} : \pi / n$  (solid line);  $0$  (dot-dashed line). Number of discrete states  $n$ : 4 (1); 8 (2); 16 (3); 32 (4); 64 (5); 128 (6).



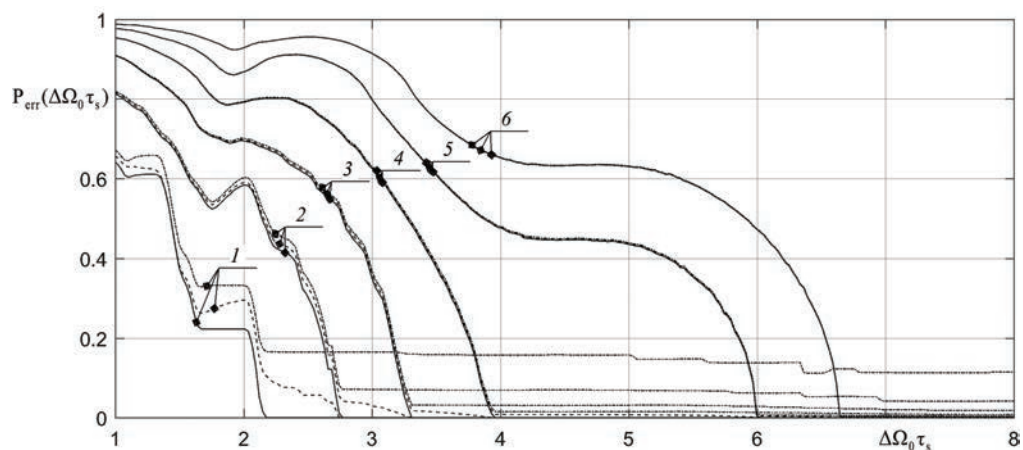
**Fig. 12.** Error probability per channel symbol depending on channel symbol time duration in the presence of ISI at the LSS output. LSS: single stage bandpass filter on coupled circuits with degree of circuit coupling  $\beta = 1$ . Non-dimensional frequency detuning  $\rho_0 = -0.5$ . Initial phase shift of PSK- $n$ -signal  $\varphi_{sc} : \pi / n$  (solid line);  $0.5\pi / n$  (dashed line);  $0$  (dot-dashed line). Number of discrete states  $n$ : 4 (1); 8 (2); 16 (3); 32 (4); 64 (5); 128 (6).



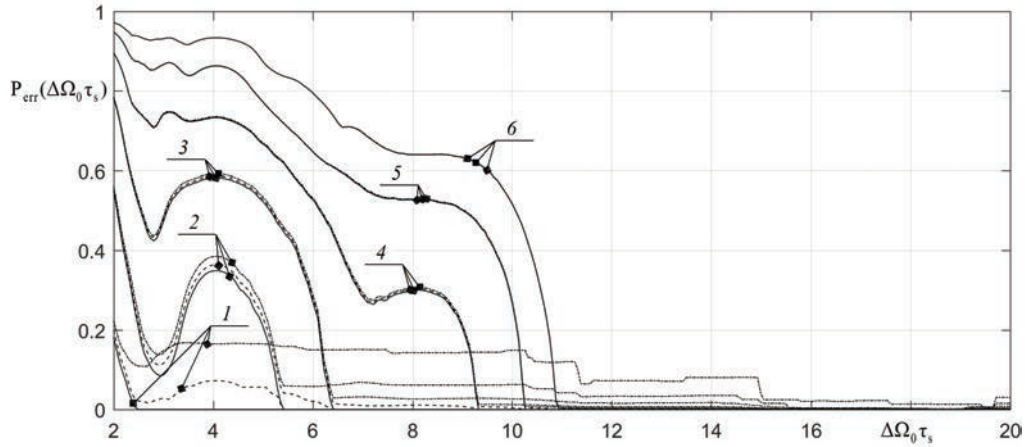
**Fig. 13.** Error probability per channel symbol depending on channel symbol time duration in the presence of ISI at the LSS output. LSS: single stage bandpass filter on coupled circuits with degree of circuit coupling  $\beta = 1$ . Non-dimensional frequency detuning  $\rho_0 = 0.5$ . Initial phase shift of PSK- $n$ -signal  $\varphi_{sc} : \pi/n$  (solid line);  $0.5\pi/n$  (dashed line); 0 (dot-dashed line). Number of discrete states  $n$ : 4 (1); 8 (2); 16 (3); 32 (4); 64 (5); 128 (6).



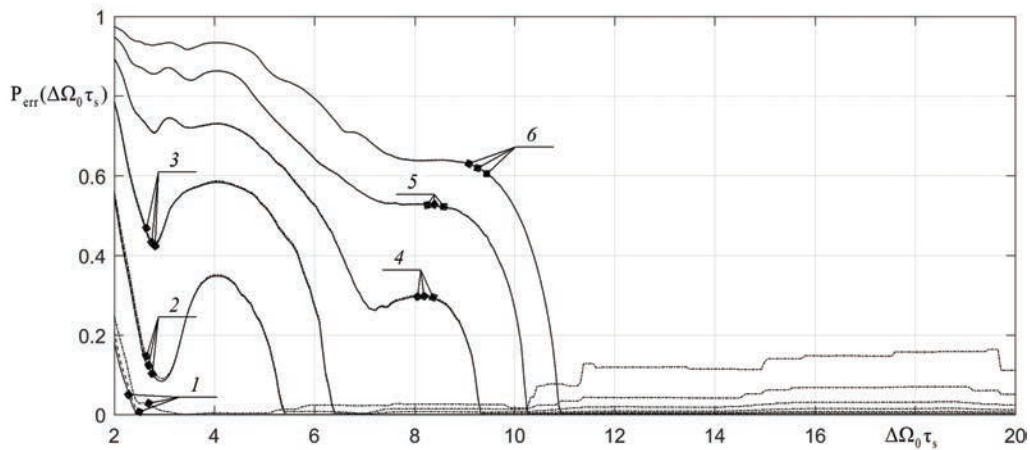
**Fig. 14.** Error probability per channel symbol depending on channel symbol time duration in the presence of ISI at the LSS output. LSS: single stage bandpass filter on coupled circuits with degree of circuit coupling  $\beta = 1$ . Non-dimensional frequency detuning  $\rho_0 = 1$ . Initial phase shift of PSK- $n$ -signal  $\varphi_{sc} : \pi/n$  (solid line);  $0.5\pi/n$  (dashed line); 0 (dot-dashed line). Number of discrete states  $n$ : 4 (1); 8 (2); 16 (3); 32 (4); 64 (5); 128 (6).



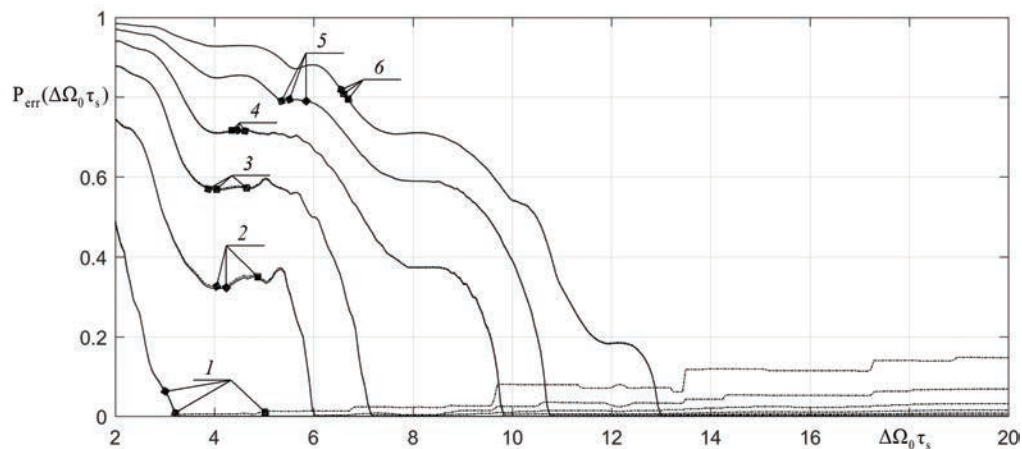
**Fig. 15.** Error probability per channel symbol depending on channel symbol time duration in the presence of ISI at the LSS output. LSS: single stage bandpass filter on coupled circuits with degree of circuit coupling  $\beta = 1$ . Non-dimensional frequency detuning  $\rho_0 = 1$ . Initial phase shift of PSK- $n$ -signal  $\varphi_{sc} : \pi/n$  (solid line);  $0.5\pi/n$  (dashed line); 0 (dot-dashed line). Number of discrete states  $n$ : 4 (1); 8 (2); 16 (3); 32 (4); 64 (5); 128 (6).



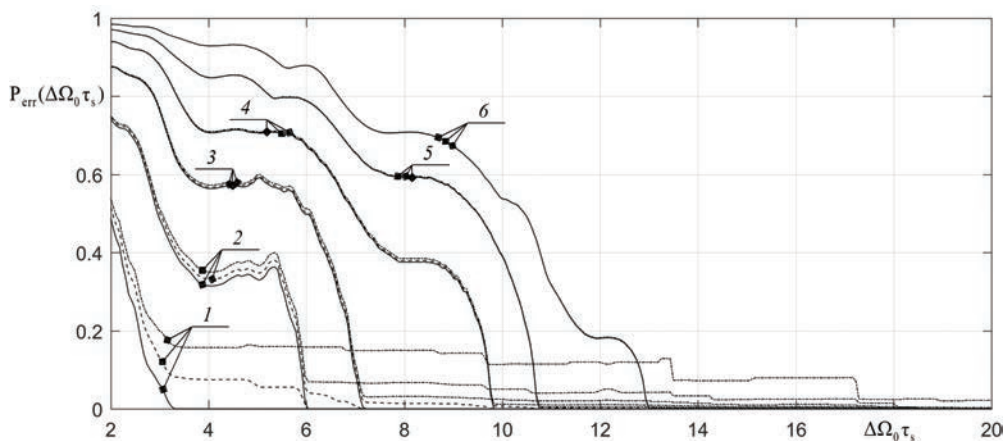
**Fig. 16.** Error probability per channel symbol depending on channel symbol time duration in the presence of ISI at the LSS output. LSS: single stage bandpass filter on coupled circuits with degree of circuit coupling  $\beta = 2.41$ . Non-dimensional frequency detuning  $\rho_0 = -0.5$ . Initial phase shift of PSK- $n$ -signal  $\varphi_{sc} : \pi/n$  (solid line);  $0.5\pi/n$  (dashed line);  $0$  (dot-dashed line). Number of discrete states  $n$ : 4 (1); 8 (2); 16 (3); 32 (4); 64 (5); 128 (6).



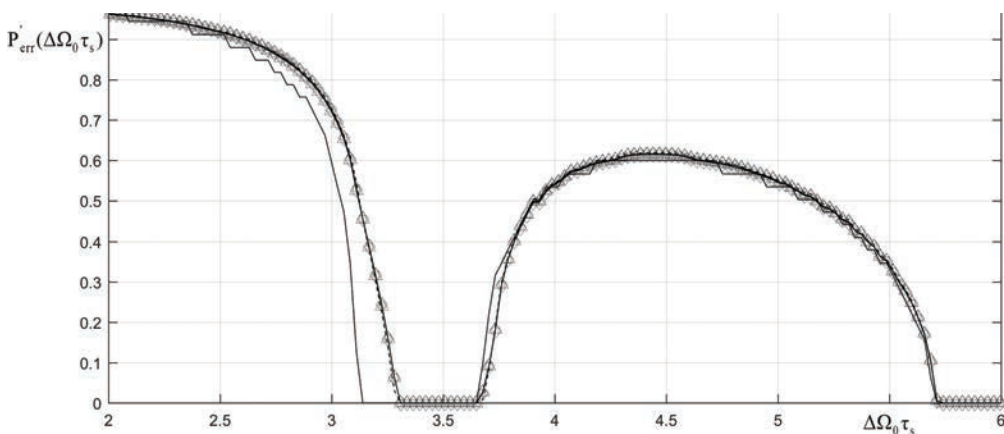
**Fig. 17.** Error probability per channel symbol depending on channel symbol time duration in the presence of ISI at the LSS output. LSS: single stage bandpass filter on coupled circuits with degree of circuit coupling  $\beta = 2.41$ . Non-dimensional frequency detuning  $\rho_0 = 0.5$ . Initial phase shift of PSK- $n$ -signal  $\varphi_{sc} : \pi/n$  (solid line);  $0.5\pi/n$  (dashed line);  $0$  (dot-dashed line). Number of discrete states  $n$ : 4 (1); 8 (2); 16 (3); 32 (4); 64 (5); 128 (6).



**Fig. 18.** Error probability per channel symbol depending on channel symbol time duration in the presence of ISI at the LSS output. LSS: single stage bandpass filter on coupled circuits with degree of circuit coupling  $\beta = 2.41$ . Non-dimensional frequency detuning  $\rho_0 = -1$ . Initial phase shift of PSK- $n$ -signal  $\varphi_{sc} : \pi/n$  (solid line);  $0.5\pi/n$  (dashed line);  $0$  (dot-dashed line). Number of discrete states  $n$ : 4 (1); 8 (2); 16 (3); 32 (4); 64 (5); 128 (6).



**Fig. 19.** Error probability per channel symbol depending on channel symbol time duration in the presence of ISI at the LSS output. LSS: single stage bandpass filter on coupled circuits with degree of circuit coupling  $\beta = 2.41$ . Non-dimensional frequency detuning  $\rho_0 = 1$ . Initial phase shift of PSK- $n$ -signal  $\varphi_{sc} : \pi/n$  (solid line);  $0.5\pi/n$  (dashed line);  $0$  (dot-dashed line). Number of discrete states  $n$ : 4 (1); 8 (2); 16 (3); 32 (4); 64 (5); 128 (6).



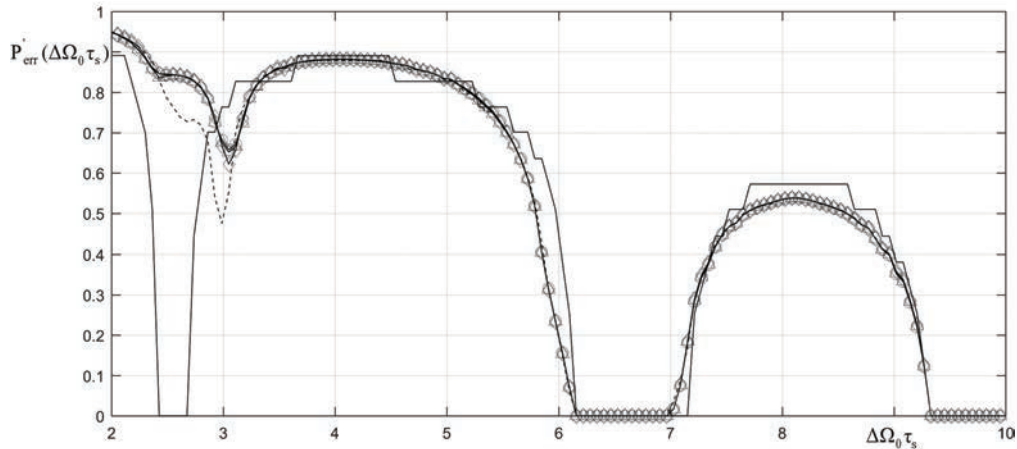
**Fig. 20.** Error probability per channel symbol depending on channel symbol time duration in the presence of ISI at the LSS output for first four symbols. LSS: tuned single stage bandpass filter on coupled circuits with degree of circuit coupling  $\beta = 1$ . Initial phase shift of PSK- $n$ -signal  $\varphi_{sc} : \pi/n$  (solid line);  $0.5\pi/n$  (dashed line);  $0$  (dot-dashed line). Number of discrete states  $n = 128$ . Number of symbol: 1 (solid line); 2 (dashed line); 3 (solid line with diamond marker); 4 (solid line with triangular marker); starting from 5 (solid line with circular marker).

additional “transparency windows” at which it is zero, which allows to increase the transmission rate of PSK- $n$ -signals. In the absence of frequency detuning the degree of manifestation of this property increases with an increase of irregularity of AFR of passband, but it persists even in the absence of irregularity. For small values of the frequency detuning “transparency windows” of dependence of error probability in general are preserved, however, changing the conditions of their manifestation and decreasing their sizes are observed.

2. The presence of frequency detuning doesn’t lead to change of configuration of resolving time relations between different PSK- $n$ -signals relatively to case of the absence of frequency detuning.

## References

1. Proakis J.G. *Digital Communications*. 4<sup>th</sup> ed. New York: McGraw-Hill, 2000. 928 p.
2. Zolotarev I.D., Miller Ya.E. *Perekhodnye protsessy v kolebatel'nykh sistemakh i tsepyakh* [Transition processes in oscillatory systems and circuits]. Moscow: Radiotekhnika, 2010. 301 p. (In Russian)
3. Feher K. *Wireless digital communications. Modulation and spread spectrum applications*. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1995. 544 p.
4. Lerner I.M. Method for capacity estimation of real communicational channels with PSK- $n$ -signals in presence of ISI and its application. *T-Comm*. 2017. Vol. 11. No. 8. Pp. 52–58.



**Fig. 21.** Error probability per channel symbol depending on channel symbol time duration in the presence of ISI at the LSS output for first four symbols. LSS: tuned single stage bandpass filter on coupled circuits with degree of circuit coupling  $\beta = 2.41$ . Initial phase shift of PSK- $n$ -signal  $\varphi_{sc} : \pi/n$  (solid line);  $0.5\pi/n$  (dashed line);  $0$  (dot-dashed line). Number of discrete states  $n = 128$ . Number of symbol: 1 (solid line); 2 (dashed line); 3 (solid line with diamond marker); 4 (solid line with triangular marker); starting from 5 (solid line with circular marker).

5. Qureshi S., Newhall E. Adaptive receiver for data transmission over time-dispersive channels. *IEEE Trans.* 1973. No. 3. Pp. 448–457.

6. Falconer D. D., Magee F. R. Adaptive channel memory truncation for maximum likelihood sequence estimation. *Bell System Technical Journal.* 1973. No. 9. Pp. 1541–1562.

7. Clark A. P., Harvey J. D., Driscoll J. P. Near maximum likelihood detection process for distorted digital signals. *The Radio and Electronic Engineer.* 1978. No. 6. Pp. 301–309.

8. Clark A. P., Najdi N. Y., Fairfield F. J. Data transmission at 19.2 kbits/s over telephone circuits. *The Radio and Electronic Engineer.* 1983. No. 4. Pp. 157–166.

9. Vachula G. M., Hill F. S. On Optimal Detection of Band-limited PAM Signals with Excess Bandwidth. *IEEE Trans.* 1981. No. 6. Pp. 886–890.

10. Weselowski K. An efficient DFE ML suboptimal receiver for data transmission over dispersive channels using two-dimensional signal constellation. *IEEE Trans.* 1987. No. 3. Pp. 336–339.

11. Zyablov V. V., Korobkov , Portnoy S. L. *Vysokoskorostnaya peredacha soobshcheniy v real'nykh kanalakh* [High-

speed transmission of messages in real channels]. Moscow: Radio i svyaz', 1991. 288 p. (in Russian)

12. Il'in G. I., Pol'skii Iu. E. Dinamicheskii diapazon i tochnost' radiotekhnicheskikh i optoelektronnykh izmeritel'nykh sistem [Dynamic range and accuracy of radio engineering and optoelectronic measuring systems] *Itogi nauki i tekhniki. Ser. Radiotekhnika* [The results of science and technology. Radio engineering series]. 1989. Vol. 39. Pp. 67–114. (In Russian)

13. Il'in G. I. Informatsionnye poteri pri prokhozhenii signalov cherez sistemu s ogranichennoy polosoy propuskaniya [Information loss during the passage of signals through the system with a limited bandwidth] *Vestnik KGTU im. A. N. Tupoleva* [Bulletin of Kazan State Technical University n.a. A. N. Tupolev]. 1997. No. 1. Pp. 83–85. (In Russian)

14. Evtyanov S. I. Perekhodnye protsessy v priemno-usilitel'nykh skhemakh [Transient processes in the receiver-amplifier circuits]. Moscow: Svjaz'izdat. 221 p. (In Russian)

15. Lerner I. M., Il'in G. I. To a question about limitation of capacity caused by selective systems with PSK- $n$ -signal impact on it. *Nonlinear World.* 2017. Vol. 15. No. 1. Pp. 8–12. (In Russian)

## К ВОПРОСУ УВЕЛИЧЕНИЯ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ В ФАЗОВЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ, РАБОТАЮЩИХ ПРИ СИЛЬНЫХ МЕЖСИМВОЛЬНЫХ ИСКАЖЕНИЯХ В ЛИНЕЙНОМ РАДИОТРАКТЕ

**ЛЕРНЕР Илья Михайлович,**

г. Казань, Россия, aviap@mail.ru

**КАМАЛЛЕТДИНОВ Наиль Надырович,**

г. Казань, Россия, kamal585@mail.ru

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** повышение скорости передачи; межсимвольные искажения; ФМн-п-сигналы; избирательные системы; вероятность ошибки.

### АННОТАЦИЯ

Неотъемлемой чертой современного общества является ежегодное увеличение объема информации, который передается посредством радиотехнических систем передачи информации. При этом закон возрастания объема информации, подлежащей передаче является экспоненциальным. Это приводит к серьезной технической проблеме при создании новых радиотехнических систем передачи информации, поскольку с каждым годом также возрастают требования по эффективному использованию частотного ресурса.

На данный момент одним из наиболее эффективных подходов решения данной проблемы считается переход к передаче, приему и обработке сигналов при наличии межсимвольных искажений в линейных избирательных системах, входящих в линейный радиотракт радиотехнических систем передачи информации. Несмотря на привлекательность такого подхода, его техническая реализация сопряжена с рядом трудностей, которые приводят к увеличению сложности самого приемного устройства при увеличении числа интерферирующих символов. В итоге это приводит к вопросу о практической реализуемости такого устройства.

В данной работе рассматривается вопрос увеличения скорости передачи информации в радиотехнических системах передачи информации, в которых уменьшение межсимвольных искажений в линейных избирательных системах линейного радиотракта не производится, а корректность восстановления передаваемой информационной последовательности достигается за счет соответствующего выбора разрешающего времени. Показано, что при больших значениях объема алфавита канальных символов разрешающее время может быть существенно снижено в том случае, если в качестве линейных избирательных систем используются полосовые фильтры. Это достигается наличие дополнительных «окон прозрачности», при которых вероятность ошибки равна нулю.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Лернер И. М., к.ф.-м.н., доцент Казанского национального исследовательского технического университета имени А.Н.Туполева – КАИ;

Камаллетдинов Н.Н., к.т.н., доцент Казанского национального исследовательского технического университета имени А.Н.Туполева – КАИ.

---

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Лернер И.М., Камаллетдинов Н.Н. К вопросу увеличения скорости передачи в фазовых радиотехнических системах передачи информации, работающих при сильных межсимвольных искажениях в линейном радиотракте // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 5. С. 92-104.