

ЛЕСНОЙ ВЕСТНИК / FORESTRY BULLETIN

Научно-информационный журнал

№ 4 ' 2019 Том 23

Главный редактор

Санаев Виктор Георгиевич, д-р техн. наук, профессор, директор Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Редакционный совет журнала

Артамонов Дмитрий Владимирович, д-р техн. наук, профессор, Пензенский ГУ, Пенза

Ашраф Дарвиш, ассоциированный профессор, факультет компьютерных наук, Университет Хелуан, Каир, Египет, Исследовательские лаборатории Machine Intelligence (MIR Labs), США

Беляев Михаил Юрьевич, д-р техн. наук, начальник отдела, зам. руководителя НТЦ РКК «Энергия» им. С.П. Королёва, Москва

Бемман Альбрехт, профессор, Дрезденский технический университет, Институт профессуры для стран Восточной Европы, Германия

Бурмистрова Ольга Николаевна, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет»

Деглиз Ксавье, д-р с.-х. наук, профессор Академик IAWS, академик Французской академии сельского хозяйства, Нанси, Франция

Драпалюк Михаил Валентинович, д-р техн. наук, профессор, проректор по науке и инновациям ФГБОУ ВПО «ВГЛТА», Воронеж

Евдокимов Юрий Михайлович, канд. хим. наук, профессор, академик Нью-Йоркской академии наук, чл.-корр. РАЕН, член центрального правления Нанотехнологического общества России, Москва

Залесов Сергей Вениаминович, д-р с.-х. наук, профессор, УГЛТУ, Екатеринбург

Запруднов Вячеслав Ильич, д-р техн. наук, профессор, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Иванкин Андрей Николаевич, д-р хим. наук, профессор, академик МАНВШ, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Кирюхин Дмитрий Павлович, д-р хим. наук, ИПХФ РАН, Черноголовка

Классен Николай Владимирович, канд. физ.-мат. наук, ИФТТ РАН, Черноголовка

Кожухов Николай Иванович, д-р экон. наук, профессор, академик РАН, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Козлов Александр Ильич, канд. техн. наук, ученый секретарь Совета ОАО «НПО ИТ», Королёв

Комаров Евгений Геннадиевич, д-р техн. наук, профессор, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Корольков Анатолий Владимирович, д-р физ.-мат. наук, профессор, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Котиев Георгий Олегович, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Кох Нильс Элерс, д-р агрономии в области лесной политики, профессор, Президент IUFRO, Центр лесного и ландшафтного планирования университета, Копенгаген, Дания

Кротт Макс, профессор, специализация «Лесная политика», Георг-Аугуст-Университет, Геттинген, Германия

Леонтьев Александр Иванович, д-р техн. наук, профессор, академик РАН, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Липаткин Владимир Александрович, канд. биол. наук, профессор, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Лукина Наталья Васильевна, член-корреспондент РАН, профессор, директор ЦЭПЛ РАН, зам. Председателя Научного совета по лесу РАН, Москва

Малашин Алексей Анатольевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Мартынюк Александр Александрович, д-р с.-х. наук, ФБУ ВНИИЛМ, Москва

Мелехов Владимир Иванович, д-р техн. наук, профессор, академик РАЕН, САФУ им. М.В. Ломоносова, Архангельск

Моисеев Николай Александрович, д-р с.-х. наук, профессор, академик РАН, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Нимц Петер, д-р инж. наук, профессор физики древесины, Швейцарская высшая техническая школа Цюриха

Обливин Александр Николаевич, д-р техн. наук, профессор, академик РАЕН, МАНВШ, заслуженный деятель науки и техники РФ, МГТУ им. Н.Э. Баумана Москва

Пастори Золтан, д-р техн. наук, доцент, директор Инновационного центра Шопронского университета, Венгрия

Полещук Ольга Митрофановна, д-р техн. наук, профессор, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Полуэктов Николай Павлович, д-р техн. наук, профессор, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Родин Сергей Анатольевич, д-р с.-х. наук, профессор, академик РАН, ВНИИЛМ, Москва

Рыкунин Станислав Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Стрекалов Александр Федорович, канд. техн. наук, РКК «Энергия», ЗАО «ЗЭМ», Королёв

Теодоронский Владимир Сергеевич, д-р с.-х. наук, профессор, академик РАЕН, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Титов Анатолий Матвеевич, канд. техн. наук, зам. начальника отделения, ученый секретарь Совета ЦУП ЦНИИМАШ, Королёв

Тричков Нено Иванов, профессор, доктор, проректор по научной работе Лесотехнического университета, София, Болгария

Федотов Геннадий Николаевич, д-р биол. наук, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

Чубинский Анатолий Николаевич, д-р техн. наук, профессор, СПбГЛТУ, Санкт-Петербург

Чумаченко Сергей Иванович, д-р биол. наук, профессор, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Шадрин Анатолий Александрович, д-р техн. наук, профессор, академик РАЕН, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Шегельман Илья Романович, д-р техн. наук, профессор, Управление научных исследований, базовая кафедра «Сквозные технологии и экономическая безопасность», главный научный сотрудник ПетрГУ, Петрозаводск

Шимкович Дмитрий Григорьевич, д-р техн. наук, профессор, ООО «Кудесник», Москва

Щепашенко Дмитрий Геннадьевич, д-р биол. наук, доцент, старший научный сотрудник Международного института прикладного системного анализа (IIASA), Австрия

Ответственный секретарь Расава Елена Александровна

Редактор Л.В. Сивай

Перевод М.А. Карпухиной

Электронная версия Ю.А. Рязжской

Учредитель МГТУ им. Н.Э. Баумана

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-68118 от 21.12.2016

Входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней

Материалы настоящего журнала могут быть перепечатаны и воспроизведены полностью или частично с письменного разрешения издательства

Выходит с 1997 года

Адрес редакции и издательства
141005, Мытищи-5, Московская обл.,
1-я Институтская, д. 1
(498) 687-41-33,
les-vest@mgul.ac.ru

Дата выхода в свет 30.08.2019.

Тираж 600 экз.

Заказ №

Объем 17,5 п. л.

Цена свободная

LESNOY VESTNIK / FORESTRY BULLETIN

Scientific Information Journal
№ 4 ' 2019 Vol. 23

Editor-in-chief

Sanaev Victor Georgievich, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Director of BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

Editorial council of the journal

Artamonov Dmitriy Vladimirovich, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Penza State
Ashraf Darwish, Associate Professor of Computer Science, Faculty of Computer Science, Helwan University, Cairo, Egypt, Machine Intelligence Research Labs (MIR Labs), USA
Belyaev Mikhail Yur'evich, Dr. Sci. (Tech.), Head of Department, Deputy Director of S.P. Korolev RSC «Energia», Moscow
Bemman Al'brekht, Professor, the Dresden technical university, professorate Institute for countries of Eastern Europe, Germany
Burmistrova Olga Nikolaevna, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Ukhta State Technical University, Ukhta
Chubinskiy Anatoliy Nikolaevich, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Saint Petersburg State Forest Technical University, St. Petersburg
Chumachenko Sergey Ivanovich, Professor, Dr. Sci. (Biol.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow
Deglise Xavier, Dr. Sci. (Agric.), Academician of the IAWS, Academician of the French Academy of Agriculture, Nancy, France
Drapalyuk Mikhail Valentinovich, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Vice-Rector for Science and Innovation Voronezh State Academy of Forestry, Voronezh
Evdokimov Yuriy Mikhaylovich, Professor, Ph. D. (Chemical); academician of the New York Academy of Sciences, corr. Academy of Natural Sciences, a member of the Central Board of Nanotechnology Society of Russia, Moscow
Zalesov Sergey Veniaminovich, Professor, the Dr. Sci. (Agric.), USFEU, Ekaterinburg
Zaprudnov Vyacheslav Il'ich, Professor, Dr. Sci. (Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow
Ivankin Andrey Nikolaevich, Professor, Dr. Sci. (Chemical), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow
Kiryukhin Dmitriy Pavlovich, Dr. Sci. (Chemical), IPCP RAS, Chernogolovka
Klassen Nikolay Vladimirovich, Ph. D. (Phys.-Math.), ISSP RAS, Chernogolovka
Kokh Nil's Elers, Professor, the Dr. of agronomics in the field of forest policy, the President of IUFRO, the Center of forest and landscape planning of university Copenhagen, Denmark
Komarov Evgeniy Gennadievich, Professor, Dr. Sci. (Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow
Korol'kov Anatoliy Vladimirovich, Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow
Kotiev George Olegovich, Professor, Dr. Sci. (Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow
Kozlov Aleksandr Il'ich, Ph. D. (Tech.), Scientific Secretary of the Board of «NPO IT», Korolev
Kozhukhov Nikolay Ivanovich, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Econ.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow
Krott Maks, Professor of Forest politics specialization, George-August-Universitet, Goettingen
Leont'ev Aleksandr Ivanovich, Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor, Dr. Sci. (Tech.), BMSTU, Moscow
Lipatkin Vladimir Aleksandrovich, Professor, Ph. D. (Biol.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

Lukina Natalya Vasilyevna, Corresponding Member of the RAS, Director of the Center for Sub-Settlement Research RAS, Deputy Chairperson of the Forest Research Council

Malashin Alexey Anatolyevich, Professor, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow
Martynyuk Aleksandr Aleksandrovich, Dr. Sci. (Agric.), VNIILM, Moscow

Melekhov Vladimir Ivanovich, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, NARFU, Arkhangelsk
Moiseev Nikolay Aleksandrovich, Professor, Dr. Sci. (Agric.) academician of the Russian Academy of Sciences, BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

Niemz Peter, Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c., Prof. for Wood Physics, ETH Zurich (Swiss Federal Institute of Technology in Zurich; Eidgenossische Technische Hochschule Zurich)

Oblivin Aleksandr Nikolaevich, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Academician of the Russian Academy of Natural Sciences and MANVSh, Honored worker of science and equipment of the Russian Federation, BMSTU, Moscow

Pasztor, Zoltan, Dr., Ph.D., Director of Innovation Center, University of Sopron, Sopron, Hungary

Poleshchuk Ol'ga Mitrofanovna, Professor, Dr. Sci. (Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

Poluektov Nikolai Pavlovich, Professor, Dr. Sci. (Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

Rodin Sergey Anatol'evich, Professor, the Dr. Sci. (Agric.), ARRISMF, Moscow

Rykunin Stanislav Nikolaevich, Professor, Dr. Sci. (Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

Shadrin Anatoliy Aleksandrovich, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

Shegelman Ilya Romanovich, Professor, Dr. Sci. (Tech.), PSU, Petrozvodsk

Shchepashchenko Dmitry Gennadievich, Associate Professor, Dr. Sci. (Biol.), Senior Researcher, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Austria

Shimkovich Dmitriy Grigor'evich, Professor, Dr. Sci. (Tech.), OOO «Kudesnik», Moscow

Strekalov Aleksandr Fedorovich, Ph. D. (Tech.), Rocket and space corporation «ENERGIA», Korolev

Teodoronskiy Vladimir Sergeevich, Professor, Dr. Sci. (Agric.), academician of the Russian Academy of Natural Sciences, BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

Titov Anatoliy Matveevich, Ph. D. (Tech.), Deputy Chief of Department, Scientific Secretary of the Board of MCC TSNIMASH, Korolev

Trichkov Neno Ivanov, professor, Dr., Vice-Rector for Research, Forestry University, Sofia, Bulgaria

Fedotov Gennadiy Nikolaevich, Dr. Sci. (Biol.), Lomonosov Moscow State University, Moscow

Assistant Editor Raseva Elena Aleksandrovna

Editor L.V. Sivay

Translation by M.A. Karpukhina

Electronic version by Yu.A. Ryazhskaya

Founder BMSTU

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media Certificate on registration ПИ № ФС 77-68118 of 21.12.2016 The journal is included in the list of approved VAK of the Russian Federation for editions for the publication of works of competitors of scientific degrees Materials of the present magazine can be reprinted and reproduced fully or partly with the written permission of publishing house It has been published since 1997

Publishing house
141005, Mytishchi, Moscow Region, Russia
1st Institutskaya street, 1
(498) 687-41-33
les-vest@mgul.ac.ru

It is sent for the press 30.08.2019.
Circulation 600 copies
Order №
Volume 17,5 p. p.
Price free

СОДЕРЖАНИЕ

К 60-летию КОСМИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА

Беляев М.Ю.

Проблемы управления при проведении экспериментов на российском сегменте МКС и участие МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана в их решении 5

**Корольков А.В., Ефремов Н.В., Сапожников В.Б., Новиков Ю.М.,
Большаков В.А., Александров Л.Г., Константинов С.Б., Партола И.С.**

Участие ФЭСТ в решении инженерных и научных задач космонавтики (к 60-летию факультета электроники и системотехники Московского государственного университета леса) 14

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Саяпин С.Н.

Проблема микродинамической чувствительности прецизионных крупногабаритных космических конструкций из высококомодульных волоконистых полимерных композиционных материалов 23

Бронников С.В.

Новые технологии поддержки деятельности экипажа космического аппарата при фотосъемке земной поверхности 32

Носкин Г.В., Хаванов Е.С., Бесчастный Р.А.

Гибридный накопитель электрической энергии на основе литий-ионных аккумуляторов и блоков суперконденсаторов для систем электроснабжения возвращаемых космических аппаратов 39

Беляев М.Ю., Воронин Ф.А., Харчиков М.А.

Контроль перемещения животных на Земле с помощью научной аппаратуры, установленной на российском сегменте Международной космической станции 49

Балаянский Л.М., Гордиенко Ю.Н., Грузевич Ю.К., Альков П.С., Чистов О.В.

Ультрафиолетовый фотоприемный модуль на основе электронно-оптического преобразователя с фотокатодом GaN/GaN на сапфире для применения в оптико-электронных комплексах космического базирования 59

Грузевич Ю.К., Ачильдиев В.М., Бедро Н.А., Евсева Ю.Н., Комарова М.Н.,

Коннова Н.С., Басараб М.А., Басараб Д.А., Успенский В.М.
Аппаратный состав и алгоритм работы электросейсмокардиоблока для неинвазивной диагностики заболеваний человека 68

Фалин А.Е., Алексеев В.В., Щепанов А.Н.,

Киклевич О.В., Котов Ю.Т., Знаменская Т.Д.
Анализ зависимости тактовой частоты процессоров от топологических норм кристаллов 76

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ТЕХНОЛОГИИ

Чернышов А.В.

Определение значения вероятности выхода из строя однократно записываемого оптического диска с записью в процессе хранения в долговременном архиве 82

Деменков Н.П., Чан Минь Динь

Оценка эффективности сильного следящего ансцентного фильтра Калмана с применением нечеткой модели 88

Сохранный Е.П.

Задача назначения приоритетов запросов на проведение сеансов связи с космическими аппаратами 98

Санников Е.В., Несмелова А.С., Несмелова К.С., Герасименко Д.А.

Разработка комплекса лабораторных и практических работ по изучению нейронных сетей 106

Полещук О.М., Поярков Н.Г., Тумор С.В.

Принятие решений на основе байесовского подхода и Z-чисел 112

Дмитриев А.Н., Есаков В.А., Уткин Г.С., Сумельтинов В.Н., Литвяк Ю.И., Стогов М.Ю.

О построении сети беспроводной связи в неподготовленных в отношении связи районах 117

Караваев М.А., Башкирцев Ю.В.

Восстановление радиаторов двигателей внутреннего сгорания полимерами 125

Зарубина А.Н., Гоцина В.А., Цапалин А.Д.,

Иванкин А.Н., Вережкин А.Н., Евстратова А.А.
Современные микрополимерные материалы для декоративно-защитных пленок и поверхностной обработки древесных материалов 134

CONTENTS

60th ANNIVERSARY OF SPACE FACULTY

Belyaev M.Yu.

Management issues in conducting experiments at ISS Russian segment and participation of BMSTU Mytishchi branch in their solution 5

Korol'kov A.V., Efremov N.V., Sapozhnikov V.B., Novikov Yu.M.,

Bol'shakov V.A., Aleksandrov L.G., Konstantinov S.B., Partola I.S.

Participation of Faculty of Electronics and systems engineering in solving engineering and scientific issues of cosmonautics (to the 60th anniversary of the Faculty of Electronics and Systems Engineering of the Moscow State Forest University) 14

TOPICAL ISSUES OF ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY DEVELOPMENT

Sayapin S.N.

Microdynamical sensitivity of precision large-size space structures from high-modulus fibrous polymercomposite materials 23

Bronnikov S.V.

New technologies to support space vehicle crew in photographing Earth surface 32

Noskin G.V., Khavanov E.S., Beschastnyy R.A.

Hybrid electric power storage based on lithium-ion batteries and supercapacitors blocks for power supply system of Earth return spacecraft 39

Belyaev M.Yu., Voronin F.A., Kharchikov M.A.

Animal movement control on Earth using scientific equipment installed on the ISS RS 49

Baliasny L.M., Gordienko Yu.N., Gruzevich Yu.K., Alkov P.S., Chistov O.V.

Ultra-violet photo-receive module based on image intensifier tube with GaN/GaAlN photocathode on sapphire for use in space-based optical-electronic systems 59

Gruzevich Y.K., Achildiev V.M., Bedro N.A., Evseeva Y.N., Komarova M.N.,

Konnova N.S., Basarab M.A., Basarab D.A., Uspenskiy V.M.

Hardware and software of electroseismocardioblock for noninvasive diagnostics of human diseases 68

Falin A.E., Alekseev V.V., Shchepanov A.N.,

Kiklevich O.V., Kotov Y.T., Znamenskaya T.D.

The analysis of processor speed dependence on geometry rules of crystals 76

COMPUTER ENGINEERING. MATH MODELING. TECHNOLOGY

Chernyshov A.V.

Evaluation of single recorded optical disc with recording failure probability during storage in a long-term archive 82

Demenkov N.P., Chan Din' Min'

Estimate of strong tracking unscented Kalman filter efficiency using a fuzzy model 88

Sokhranniy E.P.

Issue of appointing priorities for requests to carry out communication sessions with spacecrafts 98

Sannikov E.V., Nesmelova A.S., Nesmelova K.S., Gerasimenko D.A.

Development of laboratory and practical works complex to study neural networks 106

Poleschchuk O.M., Poyarkov N.G., Tumor S.V.

Decision-making based on bayesian theory and Z-numbers 112

Dmitriev A.N., Esakov V.A., Utkin G.S., Sumeltinov V.N., Litvyak Y.I., Stogov M.Y.

The construction of wireless communication network at the communication unprepared areas 117

Karavaev M.A., Bashkircev Yu.V.

The restoration of the radiators of internal combustion engines by polymers 125

Zarubina A.N., Gotsina V.A., Tsapalin A.D.,

Ivankin A.N., Verevkin A.N., Evstratova A.A.

Modern micropolymeric materials for decorative-protective films and surface treatment of wood materials 134

УДК 629.786.2

DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-5-13

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА РОССИЙСКОМ СЕГМЕНТЕ МКС И УЧАСТИЕ МФ МГТУ ИМ. Н.Э. БАУМАНА В ИХ РЕШЕНИИ

М.Ю. Беляев

ПАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева, 141070, Московская обл., г. Королев, ул. Ленина, д. 4а

mikhail.belyaev@rsce.ru

Рассмотрены проблемы, возникшие при проведении экспериментов на МКС. Указаны способы их решения, позволяющие выполнять в полете МКС различные исследования, отрабатывать новые технологии и оборудование, а также ставить перспективные научные задачи. Приведены примеры участия ученых и специалистов Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана в их решении.

Ключевые слова: орбитальная станция, космические эксперименты, проблемы управления

Ссылка для цитирования: Беляев М.Ю. Проблемы управления при проведении экспериментов на российском сегменте МКС и участие МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана в их решении // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2019. Т. 23. № 4. С. 5–13. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-5-13

*К 60-летию образования по инициативе С.П. Королева
Космического факультета*

Успехи отечественной космонавтики (запуск первого искусственного спутника Земли, первый полет человека в космическое пространство, фотографии обратной стороны Луны и многие другие величайшие достижения [1]) во многом были предопределены созданием знаменитой ракеты Р-7 [1]. Наибольших достижений ученые нашей страны достигли в области пилотируемых космических полетов, обеспечивших выполнение научно-прикладных исследований на отечественных орбитальных станциях серии «Салют», «Мир» и российском сегменте Международной космической станции (МКС) [1–3]. В процессе подготовки и реализации программ исследований на орбитальных станциях «Салют», «Мир» была создана специальная технология проведения экспериментов [3–10].

Технология проведения экспериментов на орбитальной космической станции (ОКС) предусматривает решение следующих задач:

- планирование экспериментов;
- оптимизация программы экспериментов;
- математическое моделирование;
- реализация эксперимента;
- контроль состояния научной аппаратуры и управление ее работой в полете;
- экспресс-анализ научных данных по телеметрической (ТМ) информации;
- измерение и расчет дополнительной информации для анализа и интерпретации результатов экспериментов.

Результаты и обсуждение

В период выполнения научно-исследовательских программ на станциях «Салют-4, -6, -7» были решены следующие проблемы управления при проведении экспериментов:

- планирование экспериментов: выбор оптимальных зон и построение оптимальных программ проведения экспериментов;
 - построение рациональных схем выполнения экспериментов;
 - создание математических моделей (движения орбитальных станций; физических условий на борту станции (микрперегрузки, магнитные возмущения) и т. д.);
 - разработка и использование экономичных методов проведения экспериментов;
 - автоматизированный контроль состояния научной аппаратуры по ТМ-информации и управление ее работой (МКФ-6М, БСТ-1М, КРТ-10, «Сплав-01» и т. д.);
 - экспресс-анализ научных данных («Рябина», «ММК», «Елена-Ф» и др.), реализация технологии управляемых научных экспериментов;
 - расчет дополнительных данных для интерпретации результатов экспериментов (данные магнитометров, солнечных датчиков, звездных фотометров и т. д.).
- Разработанные методы позволили при скромных ресурсах и возможностях станций «Салют-4, -6, -7» выполнить обширные программы экспериментов и исследований и решить важные задачи для обороноспособности страны.

При планировании и проведении экспериментов используются различные математические модели [3, 7]:

- движения центра масс космического аппарата по орбите и движения относительно центра масс;
- бортовых систем космического аппарата (системы управления движением, электропитания и т. д.);
- физических условий, возникающих на космическом аппарате (микротрегрузки, электромагнитные помехи и т. д.);
- деятельности экипажа;
- наземного контура управления;
- описания «внешних» факторов космического полета (магнитного поля Земли (МПЗ), метеорных частиц, облачности по трассе полета и т. д.).

Орбитальная космическая станция «Мир», выведенная на орбиту 20 февраля 1986 г., была станцией нового поколения. Управление ее полетом осуществлялось под руководством заместителя генерального конструктора РКК «Энергия» В.В. Рюмина, выпускника кафедры «Системы автоматического управления» (САУ) МЛТИ (с 2017 г. Мытищинский филиал (МФ) МГТУ им. Н.Э. Баумана). Отметим следующие особенности решения проблем управления при выполнении экспериментов на ОКС «Мир» [6–8]:

- постоянно ориентированный полет ОКС «Мир» с помощью гиродинов;
- необходимость создания комплекса математических моделей на персональных компьютерах для обеспечения исследований прогноза работы системы электропитания; процесса управления ориентацией ОКС «Мир» с помощью гиродинов; «затенения» полей зрения приборов элементами конструкции, прогноза сеансов связи ОКС через спутник-ретранслятор и т. д.;
- передача научных данных по каналам связи постановщикам экспериментов для экспресс-анализа, использование телеуправления для выполнения экспериментов;
- первое использование спутниковой навигационной системы.

Особенности управления ОКС «Мир» потребовали непрерывного использования в течение полета созданного комплекса математических моделей и разработанных методов управления. Это позволило выполнить беспрецедентную программу исследований и экспериментов, в том числе с рентгеновской аппаратурой на модуле «Квант», стереосканером MOMS на модуле «Природа» и др. [6–8]. В выполнении этих работ в РКК «Энергия» принимал активное участие выпускник кафедры «Системы автоматического управления», канд. техн. наук, доцент В.М. Стажков.

Одновременно с выполнением полета ОКС «Мир» шли работы по проекту МКС. Директором проекта МКС со стороны России был В.В. Рюмин.

20 ноября 1998 г. на орбиту был выведен первый модуль «Заря» и 23 марта 2001 г. полет ОКС «Мир» был завершен [8].

Международная космическая станция — самый масштабный космический проект современности, в осуществлении которого принимают участие многие выпускники МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, решая сложные организационные и технические вопросы (А.И. Григорьев, К.Н. Жолобнюк и др.), выполняя значимые научно-технические задачи. Станция предназначена для проведения на ее борту различных экспериментов и исследований, а также для отработки новых технологий и оборудования в условиях орбитального полета [2]. Масса МКС еще до завершения ее полного развертывания более чем в 2 раза превышает массу ОКС «Мир» в последние годы его эксплуатации. Для МКС также характерны чрезвычайно крупные размеры и наличие большого количества сложных бортовых систем. Она представляет собой весьма протяженную конструкцию, состоящую из модулей стран — участниц программы создания и эксплуатации станции, объединенных в американский и российский сегменты.

Необходимость эксплуатации и управления таким сложным, массивным объектом, как МКС, потребовала решения некоторых новых научных и практических задач [8]. В процессе полета станции вследствие изменения конфигурации и массы за счет стыковок с новыми модулями, доставки и перемещения дополнительных грузов и расходования ресурсов, постоянно изменяются ее массово-инерционные характеристики. Поэтому для управления полетом МКС и проведения на ее борту научных исследований необходимо определение и уточнение в полете тензора инерции станции, ее массы, положения центра масс, параметров действующих аэродинамических моментов, микроускорений. В целях решения данных специфических задач динамики и управления полетом МКС были организованы космические эксперименты «Тензор», «Среда МКС», «Изгиб» и др. [11–23]. Мытищинский филиал МГТУ является участником космических экспериментов «Среда-МКС», «Изгиб», «Вектор-Т», «Таймер» и др.

Технические возможности МКС, связанные с ее оснащенностью современными бортовыми системами и наличием экипажа, позволяют выполнять на ней уникальные научные исследования и космические эксперименты [3]. Вместе с тем некоторые конструктивные решения и характеристики ряда бортовых систем МКС создают определенные помехи и специфические особенности для выполнения исследований. Для разработки методов и технологии создания благоприятных условий проведения экспериментов в области микрогравитации были организованы космические эксперименты на российском сегменте МКС и проведены специальные исследования.

Изучение характеристик и возможностей МКС и отработка на ней методов управления, новых технологий и аппаратуры

В процессе подготовки и реализации космических экспериментов «Тензор», «Среда МКС» и др. были разработаны методы, алгоритмы и программно-математическое обеспечение уточнения динамических характеристик МКС в полете. С помощью разработанных методов периодически уточнялся тензор инерции станции и определялись некоторые другие динамические параметры МКС. При этом были разработаны и использовались разные способы оценки тензора инерции, определения положения центра масс и аэродинамических параметров [11–13]. Для определения массы станции были отработаны два способа — на основе использования двигателей транспортного грузового корабля (ТГК) «Прогресс» [12] и с помощью отделяемого от МКС спутника [13].

Разработанные методы и программно-математическое обеспечение уточнения динамических характеристик и полученные с их помощью данные регулярно использовались в процессе управления полетом МКС. Кроме того, они успешно использовались в процессе эксплуатации геостационарного спутника «Ямал-200» для управления ориентацией космического аппарата по прогнозу его углового движения, что было сделано впервые в мировой практике [14] и позволило эксплуатировать спутник более 10 лет. Такой успех во многом был обеспечен научными исследованиями и практической деятельностью выпускника кафедры «Системы автоматического управления» канд. техн. наук Ю.Р. Банита [11, 14], работающего в настоящее время главным инженером заместителем генерального директора АО «Газпром космические системы».

В рамках организованных на МКС космических экспериментов «Среда МКС», «Изгиб» исследуется микрогравитационная обстановка на станции [15–17]. Микроускорения на МКС обусловлены вращением станции вокруг центра масс, неоднородностью поля земного притяжения в пределах МКС, силами негравитационной природы (аэродинамическим торможением, работой двигателей станции и т. д.), а также функционированием бортовых систем и деятельностью экипажа станции. В микроускорениях выделяют квазистатические и вибрационные составляющие.

На основе большого количества измерений, выполненных различными датчиками, изучено поведение вибрационной составляющей микроускорений при различных режимах полета и при работе различных бортовых систем МКС.

Предложена методика обработки данных. Предусмотрено решение таких задач, как выделение циклических трендов из полученных результатов измерений, оценка спектральной плотности составляющей этих результатов с непрерывным спектром, их низкочастотная фильтрация. Исследованы колебания конструкции, вызванные работой двигателей. Изучены фоновые возмущения на МКС и возмущения при физических упражнениях экипажа [15–17]. С учетом крупных размеров МКС для изучения микрогравитационной обстановки на станции необходимы переносные измерители микроускорений. Их разработкой занимается заместитель заведующего кафедрой «Системы автоматического управления», канд. техн. наук, доцент Ю.П. Батырев.

При планировании и проведении многих экспериментов следует учитывать деформацию корпуса МКС, которая возникает после выведения ее на орбиту вследствие разности давления внутри и снаружи МКС. В процессе орбитального движения МКС деформация ее корпуса возникает вследствие изменения температуры за бортом, выполнения в полете динамических операций и др. Деформация может привести к отклонению чувствительных осей установленных на корпусе станции приборов на величину до $1...2^\circ$. Традиционно деформация корпуса орбитальных станций контролировалась и учитывалась в расчетах при наведении научных приборов на исследуемые объекты с помощью выполнения специальных юстировочных работ с использованием измерений от звездных датчиков. Такие исследования планируются на МКС в эксперименте «Качка». Кроме того, в рамках эксперимента «Среда МКС» был предложен новый метод определения деформации корпуса МКС на основе выполнения фото- и видеосъемки аппаратурой, устанавливаемой на иллюминаторе [18].

В настоящее время осуществляется набор статистики по изучению деформаций различных элементов конструкции МКС при изменениях воздействия на них солнечного излучения, проведении динамических операций (изменении ориентации станции, коррекции орбиты, стыковочных операций и др.).

В рамках технических экспериментов на МКС проводится также изучение собственного магнитного поля, ее собственной внешней атмосферы. Большое внимание в рамках экспериментов («Пилот», «Таймер» и др.) уделяется также изучению особенностей деятельности космонавтов в условиях орбитального полета [19]. В этих работах принимает активное участие выпускница кафедры Н.А. Тарасова.

При управлении полетом МКС, проведении экспериментов и решении других задач необ-

ходимо прогнозировать движение станции по орбите, поскольку она является объектом, обладающим значительными размерами и сложной, изменяющейся конфигурацией. Ориентация МКС изменяется при выполнении различных динамических операций. При решении задачи высокоточного прогнозирования движения МКС важно учитывать угловое движение станции вокруг ее центра масс, наличие гравитационных и аэродинамических возмущений, срабатывание двигателей ориентации станции, изменение сил аэродинамического сопротивления при изменениях конфигурации и ориентации МКС. Для отработки методов учета всех этих факторов при высокоточном прогнозировании движения станции на МКС разработан и успешно выполняется эксперимент «Вектор-Т».

Одной из задач этого эксперимента является уточнение параметров атмосферы на высоте полета для повышения точности определения траектории движения МКС. На плотность атмосферы влияют многие факторы: активность Солнца, геомагнитная активность и другие, из-за влияния которых значение плотности атмосферы может значительно отличаться от прогнозируемого. Это обстоятельство часто приводит к трудностям эксплуатации космических аппаратов.

Задаче уточнения прогноза движения космического аппарата в плотных слоях атмосферы посвящены многие работы, однако она далека от своего решения. В эксперименте «Вектор-Т» предложен следующий способ решения этой задачи.

От станции отделяется спутник идеальной сферической формы, размеры и масса которого точно известны [20]. С помощью наземных станций радиоконтроля орбиты непрерывно измеряются и рассчитываются параметры движения спутника. Поскольку масса и размеры сферического спутника точно известны, можно решить обратную задачу — по движению спутника по орбите можно рассчитать плотность атмосферы и уточнить параметры модели атмосферы. Спутник и МКС первое время движутся по близким орбитам, поэтому полученные уточненные параметры атмосферы могут быть использованы для прогноза траектории движения МКС.

Точное знание параметров атмосферы позволяет решить и многие другие задачи, например, уточнить значение квазипостоянных составляющих микроперегрузок, возникающих на МКС в полете из-за влияния атмосферы. Именно квазипостоянные значения микроперегрузок наиболее важны для проведения и анализа экспериментов в области микрогравитации.

17 августа 2017 г. был осуществлен запуск очередного спутника из серии «Сфера в рамках эксперимента «Вектор-Т»». В связи со значительным

усложнением конструкции МКС перед запуском спутника была смоделирована траектория его полета после запуска, исключая соударение спутника со станцией.

Для уточнения параметров атмосферы в рамках космического эксперимента «Вектор-Т» разработан также метод, основанный на определении движения свободно падающего тела внутри герметичного отсека станции [21]. Это движение вызвано тем, что на МКС действует сила сопротивления атмосферы Земли, а объекты на борту защищены от воздействия набегающего потока корпусом станции. В реализации данного метода на борту МКС и в обработке результатов космического эксперимента активное участие принимают сотрудники кафедры «Системы автоматического управления».

В целях отработки методов автономной навигации для планируемой лунной программы в рамках космического эксперимента «Вектор-Т» отработывается технология определения орбиты космического аппарата по фотоснимкам планеты [22].

Результаты работ, выполненных в рамках технических космических экспериментов «Вектор-Т», «Тензор», «Среда-МКС», «Изгиб», были удостоены премии Правительства Российской Федерации для молодых ученых за 2008 г. Среди лауреатов этой премии и выпускник факультета С.Н. Рожков.

В программе работы МКС используются российские ТГК «Прогресс», которые после выполнения основных задач в составе МКС нередко обладают запасом ресурсов основных систем. Использование по возможности этих ресурсов для решения исследовательских задач в автономном полете ТГК после расстыковки от станции увеличивает эффективность работы ТГК, а также программы исследований на МКС в целом.

Транспортные грузовые корабли могут применяться для проведения исследований в различных направлениях:

- отработка, тестирование и сертификация в полете различной аппаратуры, материалов, систем в интересах программ других космических аппаратов;

- выполнение экспериментов в области дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с помощью дополнительно установленной аппаратуры;

- выполнение экспериментов в области микрогравитации с использованием особых возможностей ТГК;

- запуск микроспутников и зондов после расстыковки ТГК от МКС и выхода на определенную орбиту.

Для выполнения экспериментов в рамках космического эксперимента «Изгиб» с помощью ТГК «Прогресс» разработаны новые эффектив-

ные технологии [23], в том числе технология изучения верхних слоев атмосферы с помощью трассовой системы, разворачиваемой с ТГК.

Для МКС, имеющей очень большие размеры и массу, гиродины, установленные на американском сегменте, не обладают располагаемым кинетическим моментом, достаточным для наведения станции на исследуемые объекты или даже для точного поддержания ориентации станции относительно орбитальной либо инерциальной системы координат. Понятно, что при таком ограничении на возможность ориентации МКС выполнять наведение на исследуемые объекты жестко закрепленных на корпусе станции приборов практически невозможно.

Для решения этой проблемы наведение исследовательской аппаратуры Российского сегмента МКС на изучаемые объекты без разворотов станции осуществляется с помощью подвижных платформ наведения (ППН). Наличие поворотных платформ предоставляет дополнительные возможности наведения аппаратуры независимо от ориентации станции. Их использование потребовало разработки специальных методов управления для наведения на исследуемые объекты космического эксперимента

Использование нескольких ППН позволяет также осуществлять одновременное наблюдение разных объектов. Одна двухосная ППН уже используется с начала 2014 г. на МКС для наведения в рамках космического эксперимента «МКС-Напор» на изучаемые объекты камеры высокого разрешения. В целях расширения возможностей исследования наземных объектов предполагается отправка на борт МКС новых ППН и использование разработанных в период полета ОС «Салют» и «Мир» методов оптимального планирования экспериментов [3, 9, 10]. Разработанные методы планирования позволяют определять оптимальные моменты времени выполнения наблюдений заданных объектов и получать оптимальные программы наблюдения объектов из каталогов [24]. При планировании наблюдений требуется выбрать оптимальный набор зон из общего числа возможных зон наблюдений. При этом сформированная программа наблюдений должна удовлетворять предъявляемому (выбранному) критерию. Критерий выбора зон может формироваться на основе различных требований — от максимизации эффективности наблюдений по выбранному критерию оценки эффективности (информативности) наблюдений до минимизации расхода выбранного вида ресурса. При этом должны выполняться задаваемые условия/требования/ограничения по другим сформулированным критериям эффективности и видам ресурсов. Множество одиночных критериев с различными

весовыми коэффициентами может быть сведено к единому объединенному критерию путем их свертки в единый критерий оптимальности [24].

Задача оптимизации программы наблюдений является частично целочисленной задачей линейного программирования и решается методами линейного и целочисленного программирования. В этом направлении имеется много важных и интересных научных задач для ученых Космического факультета Мытищинского филиала (особенно, в случае использования одновременно нескольких ППН).

Кроме того, следует заметить, что орбитальные станции обладают уникальными возможностями для обеспечения наблюдений исследуемых объектов даже без выполнения разворотов станции или аппаратуры. Поскольку орбиты орбитальных станций, как правило, имеют высоту ~400 км, то для поддержания орбиты станции постоянно проводятся коррекции, топливо для выполнения которых доставляется с помощью грузовых кораблей. При выполнении коррекций на подъем орбиты существует возможность их проведения в различные временные интервалы и с различной величиной импульса. Поэтому одновременно с подъемом высоты орбиты возможно обеспечивать прохождение станции над требуемыми исследуемыми объектами. Учет в программе выполнения коррекций орбиты такой разработанной методики позволяет не только поддержать полет станции на требуемой высоте, но и обеспечит возможность наблюдения с нее заданных объектов на земной поверхности и небесной сфере аппаратурой, жестко закрепленной на корпусе станции [8].

Изучение характеристик и возможностей МКС в технических космических экспериментах и разработанные методы управления и проведения научных экспериментов позволяют отрабатывать в полете станции новые технологии и конструкторские решения. Большое внимание в программе научно-прикладных исследований на МКС уделяется экспериментам по изучению Земли и ее атмосферы. Большое количество наблюдений и исследований было выполнено в космическом эксперименте «Ураган» [25], в котором использовались фото- и спектрометрические приборы, а также была создана новая аппаратура в ближнем, среднем и дальнем ИК-диапазонах, спектрометрическая аппаратура с улучшенными характеристиками, серия ППН для автоматического наведения измерительной аппаратуры на исследуемые объекты. Создаваемая ИК-аппаратура позволяет, например, обнаруживать участки возгорания размером 2...3 м. В космическом эксперименте «Ураган» отрабатывается также технология оценки по фотоснимкам Земли развития потенциально опасных и катастрофических явлений: схода ледников, пожаров, наводнений.

В создании научной аппаратуры для космического эксперимента «Ураган», проведении эксперимента на Российском сегменте МКС и обработке получаемых результатов принимают активное участие выпускники Космического факультета и кафедры «Системы автоматического управления» Э.Э. Сармин, канд. техн. наук М.В. Черемисин, А.М. Есаков и др. [25, 26]. Научная аппаратура космического эксперимента «Ураган» используется и в других космических экспериментах: «Дубрава» (постановщик МФ МГТУ), «Сценарий» (МФ МГТУ — участник «Сценарий»).

В 2018 г. на МКС в соответствии с Рамочным соглашением между Роскосмосом и Германским аэрокосмическим центром DLR в рамках космического эксперимента «Ураган» доставлена научная аппаратура «ИКАРУС» [27], с помощью которой будут проводиться исследования миграции животных и птиц и решаться другие важные научные задачи. Предварительно на исследуемых животных и объектах будут размещаться миниатюрные датчики массой 5 г [27].

Важное место в программах работ на МКС занимают исследования в области робототехники, совершенствования систем космических аппаратов, а также отработка технологий, необходимых для выполнения планируемой лунной программы [22]. Успешному выполнению исследований и экспериментов на МКС способствуют разработанные методы управления и созданная высокоскоростная система передачи научных данных, информационно-управляющая система (ИУС), спутниковая навигационная система и др. [28].

Выводы

Благодаря организованным на МКС техническим экспериментам и проведенным исследованиям были изучены реальные характеристики и возможности орбитальной станции, уточнены динамические характеристики МКС, определены магнитные помехи, возникающие на станции в полете, исследована деформация корпуса МКС из-за температурных и других факторов. Большое внимание при проведении технических космических экспериментов на МКС было уделено изучению микровозмущений, возникающих в процессе функционирования станции, особенностям деятельности космонавтов в условиях орбитального полета. Выполненные исследования показали необходимость разработки новых методов управления станцией и проведения на ней целевых работ в части прогнозирования движения крупногабаритной орбитальной станции, наведения научных приборов на изучаемые объекты и т. п. Разработанные и отработанные в полете методы управления станцией и проведения научных экспериментов позволили выполнять в полете МКС исследования,

отрабатывать различные технологии и оборудование и ставить новые научные задачи. В решении научных задач на МКС активное участие принимают выпускники и сотрудники Космического факультета МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Важнейшей для нашей страны задачей, решаемой с помощью космических технологий, является контроль территории (своей и прилегающей). Поскольку большую часть территории РФ составляют лесные угодья, задача, связанная с исследованием и контролем лесов с помощью космических методов, приобретает особое значение. Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, в состав которого входят Космический факультет и Факультет лесного хозяйства, лесопромышленных технологий и садово-паркового строительства, должен внести значительный вклад в решение этой важной для страны задачи.

Значимое место в программе исследований на МКС отводится также образовательным экспериментам. Мытищинский филиал МГТУ является участником одного из таких экспериментов (образовательный космический эксперимент «Великое начало», портал «Планета Королёва») и готовит новые научно-прикладные и образовательные космические эксперименты, которые будут способствовать подготовке высококвалифицированных специалистов для космической отрасли и народного хозяйства страны.

Список литературы

- [1] Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва. 1946–1996 / под ред. Ю.П. Семенова. Королев: РКК «Энергия», 1996. 670 с.
- [2] Микрин Е.А. Перспективы развития отечественной пилотируемой космонавтики // Космическая техника и технологии, 2017. № 1. С. 5–11.
- [3] Беляев М.Ю. Научные эксперименты на космических кораблях и орбитальных станциях. М.: Машиностроение, 1984. 264 с.
- [4] Беляев М.Ю. Оперативное планирование научных экспериментов, проводимых с помощью КА // Космические исследования, 1980. № 2. С. 235–241.
- [5] Беляев М.Ю. Основные задачи и принципы построения наземно-бортового комплекса управления экспериментами, проводимыми с помощью космических аппаратов // Управляющие системы и машины, 1980. № 4. С. 103–108.
- [6] Математическое обеспечение экспериментов, выполняемых на орбитальных комплексах «Мир», «Салют-7» и научных модулях / под ред. В.В. Рюмина, М.Ю. Беляева // Ракетно-космическая техника, 1991. Сер. XII. Вып. 2. 176 с.
- [7] Математическое моделирование — основа создания и эксплуатации сложных орбитальных комплексов / под ред. Н.А. Брюханова, М.Ю. Беляева // Ракетно-космическая техника, 2008. Сер. XII. Вып. 1. 191 с.
- [8] Проблемы и задачи повышения эффективности программ исследований на космических кораблях и орбитальных станциях / под ред. В.П. Легостаева, М.Ю. Беляева // Ракетно-космическая техника, 2011. Сер. XII. Вып. 1–2. 205 с.

- [9] Беляев М.Ю., Рулев Д.Н. Оптимизация программы экспериментов при оперативном планировании исследований, выполняемых с КА // *Космические исследования*, 1987. № 1. С. 30–36.
- [10] Ryumin V.V., Belyaev M.Yu. Problems of control arised during the implementation of scientific research program onboard the multipurpose orbital station // *Acta Astronautica*, 1987, v. 15, pp. 739–746.
- [11] Банит Ю.Р., Беляев М.Ю., Добринская Т.А., Ефимов Н.И., Сазонов В.В., Стажков В.М. Определение тензора инерции МКС по телеметрической информации // *Космические исследования*, 2005. Т. 43. № 2. С. 135–146.
- [12] Беляев М.Ю., Завалишин Д.А., Егоров Н.А., Спаржин Ю.В., Хамиц И.И., Шутиков М.А., Сазонов В.В. Определение массы Международной космической станции в полете // *Космонавтика и ракетостроение*, 2005. № 4. С. 224–232.
- [13] Беляев М.Ю., Завалишин Д.А. Способ определения массы космической станции в полете. Пат. 2301181 Российская Федерация, МПК В64G 1/10. Приор. 24.03.2005; заявитель и патентообладатель ПАО РКК «Энергия»; опубл. 20.06.2007, Бюл. № 17.
- [14] Севастьянов Н.Н., Бранец В.Н., Беляев М.Ю., Завалишин Д.А., Платонов В.Н., Банит Ю.Р., Сазонов В.В. Исследование возможности управления КА «Ямал-200» с использованием математической модели движения // XIV Санкт-Петербургская Междунар. конф. по интегрированным навигационным системам, Санкт-Петербург, ЦНИИ «Электронприбор», 28–30 мая 2007 г. СПб.: Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», 2007. С. 196–203.
- [15] Беляев М.Ю., Бабкин Е.В., Рябуха С.Б., Рязанцев В.В. Микроускорения на Международной космической станции при физических упражнениях экипажа // *Космические исследования*, 2011. Т. 49. № 2. С. 167–181.
- [16] Беляев М.Ю., Волков О.Н., Рябуха С.Б. Микровозмущения на Международной космической станции // *Космическая техника и технологии*, 2013. № 3. С. 14–24.
- [17] Завалишин Д.А., Беляев М.Ю., Сазонов В.В. Определение характеристик частот упругих колебаний конструкции МКС // *Космические исследования*, 2010. Т. 48. № 4. С. 362–370.
- [18] Монахов М.И., Беляев М.Б., Волков О.Н. Способ определения деформации корпуса космического аппарата в полете. Пат. 2605232 Российская Федерация, МПК В64G 1/22. Приор. 15.06.2015; заявитель и патентообладатель ПАО РКК Энергия; опубл. 20.12.2016. Бюл. № 35.
- [19] Belyaev M.Y., Bronnikov S.V., Petrov V.M., Sekerzh-Zenkovich S.Ya. Integrated study of the iss as an environment for human-operator 'life and activities // *Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC Sep. «63rd International Astronautical Congress. 2012, IAC 2012» Naples, 01–05 October 2012. Agenzia Spaziale Italiana (ASI), pp. 4078–4082.*
- [20] Алямовский С.Н., Беляев М.Ю., Рулев Д.Н., Сазонов В.В., Тарасова М.М. Сферические спутники — от начала космической эры до современных экспериментов // *Космическая техника и технологии*, 2017. № 4 (19). С. 5–14.
- [21] Беляев М.Ю., Рулев Д.Н., Алямовский С.Н. Способ определения плотности атмосферы на высоте полета космического аппарата. Пат. 2016150068 Российская Федерация, МПК В64G 3/00. Приор. 19.12.2016; заявитель и патентообладатель ПАО «РКК «Энергия»; опубл. 20.06.2018. Бюл. № 17.
- [22] Микрин Е.А., Беляев М.Ю., Боровихин П.А., Караваев Д.Ю. Отработка на МКС технологии автономной навигации с помощью съемок экипажа для задачи облета Луны // XXV Санкт-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам, Санкт-Петербург, ЦНИИ «Электронприбор», 28–30 мая 2018 г. СПб.: ЦНИИ «Электронприбор», 2018. С. 7–13.
- [23] Беляев М.Ю., Матвеева Т.В., Рулев Д.Н. Возможные технологии управления транспортными грузовыми объектами «Прогресс» при проведении экспериментов в автономном полете // *Гироскопия и навигация*, 2017. Т. 25. № 3 (98). С. 32–48.
- [24] Беляев М.Ю., Боровихин П.А., Караваев Д.Ю., Рулев Д.Н. Управление подвижными платформами при наведении научной аппаратуры на изучаемые объекты в эксперименте «Ураган» на Международной космической станции // XXIV Санкт-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам, Санкт-Петербург, ЦНИИ «Электронприбор», 29–31 мая 2017 г. СПб.: ОАО «Концерн» ЦНИИ «Электронприбор», 2017. С. 44–47.
- [25] Беляев М.Ю., Десинев Л.В., Караваев Д.Ю., Сармин Э.Э., Юрина О.А. Аппаратура и программно-математическое обеспечение для изучения земной поверхности с борта российского сегмента Международной космической станции по программе «Ураган» // *Космонавтика и ракетостроение*, 2015. № 1. С. 63–70.
- [26] Belyaev M.Y., Cheremisin M.V., Esakov A.M. Integrated monitoring of earth surface from onboard ISS Russian segment // 69th International Astronautical Congress («IAC 2018 - involving everyone»), Bremen, Germany, Center of Applied Space Technology and Microgravity, 1–5 October 2018. Published by the IAF, pp. 1–9.
- [27] Беляев М.Ю., Викельски М., Лампен М., Легостаев В.П., Мюллер У., Науманн В., Тертицкий Г.М., Юрина О.А. Технология изучения перемещения животных и птиц на Земле с помощью аппаратуры ICARUS на российском сегменте МКС // *Космическая техника и технологии*, 2015. № 3. С. 38–51.
- [28] Микрин Е.А., Беляев М.Ю. Пилотируемая космонавтика — основа для развития ракетно-космической техники // *Тр. LI Научных чтений К.Э. Циолковского. Секция «Проблемы ракетной и космической техники»*, Казань, 20–22 сентября 2016. Казань: КГТУ, 2017. С. 5–15.

Сведения об авторе

Беляев Михаил Юрьевич — д-р техн. наук, профессор, зам. руководителя научно-технического центра ПАО РКК «Энергия», mikhail.belyaev@rsce.ru

Поступила в редакцию 19.04.2019.

Принята к публикации 15.07.2019.

MANAGEMENT ISSUES IN CONDUCTING EXPERIMENTS AT ISS RUSSIAN SEGMENT AND PARTICIPATION OF BMSTU MYTISHCHI BRANCH IN THEIR SOLUTION

M.Y. Belyaev

RSC «Energia» by S.P. Korolev, 4a, Lenina st., 141070, Korolev, Moscow reg., Russia

mikhail.belyaev@rsce.ru

In the process of carrying out research at the Salyut and Mir orbital stations, special control methods and technologies for conducting space experiments were developed, which made it possible to implement extensive scientific programs. The need to operate the International Space Station (ISS), the first module of which was put into orbit on November 20, 1998, required the solution of a number of new scientific and practical problems caused by certain features of the experiments conducted on it. The report describes the problems that have arisen during the experiments on the ISS, and indicates their solutions, allowing to perform various studies in the ISS flight, to work out new technologies and equipment, and also to set promising scientific tasks. Examples are given of the participation of scientists and specialists from the Mytishchi branch of the Bauman Moscow State Technical University in their decision.

Keywords: orbital station, space experiments, control problems

Suggested citation: Belyaev M.Yu. *Problemy upravleniya pri provedenii eksperimentov na rossiyskom segmente mks i uchastie MF MGTU im. N.E. Baumana v ikh reshenii* [Management issues in conducting experiments at ISS Russian segment and participation of BMSTU Mytishchi branch in their solution]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 4, pp. 5–13. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-5-13

References

- [1] *Raketno-kosmicheskaya korporatsiya «Energia» imeni S.P. Koroleva. 1946–199* [The Energia Rocket and Space Corporation named after S.P. Korolev. 1946–1996]. Ed. Yu.P. Semenov. Korolev: RSC Energia, 1996, 670 p.
- [2] Mikrin E.A. *Perspektivy razvitiya otechestvennoy pilotiruemykh kosmonavtiki* [Prospects for the development of domestic manned space flight] *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii* [Space equipment and technology], 2017, no. 1, pp. 5–11.
- [3] Belyaev M.Yu. *Nauchnye eksperimenty na kosmicheskikh korablyakh i orbital'nykh stantsiyakh* [Scientific experiments on spacecraft and orbital stations]. Moscow: Mashinostroenie, 1984, 264 p.
- [4] Belyaev M.Yu. *Operativnoe planirovanie nauchnykh eksperimentov, provodimykh s pomoshch'yu KA* [Operational planning of scientific experiments conducted using spacecraft] *Kosmicheskie issledovaniya* [Space research], 1980, no. 2, pp. 235–241.
- [5] Belyaev M.Yu. *Osnovnye zadachi i printsipy postroyeniya nazemno-bortovogo kompleksa upravleniya eksperimentami, provodimymi s pomoshch'yu kosmicheskikh apparatov* [The main tasks and principles of building a ground-on-board complex for controlling experiments conducted with the help of spacecraft]. *Upravlyayushchie sistemy i mashiny* [Control Systems and Machines], 1980, no. 4, pp. 103–108.
- [6] *Matematicheskoe obespechenie eksperimentov, vypolnyaemykh na orbital'nykh kompleksakh «Mir», «Salyut-7» i nauchnykh modulyakh* [Mathematical support of experiments performed on the Mir, Salyut-7 orbital complexes and scientific modules] Ed. V.V. Ryumin, M.Yu. Belyaev. *Raketno-kosmicheskaya tekhnika* [Rocket and space technology], 1991, ser. XII, iss. 2, 176 p.
- [7] *Matematicheskoe modelirovanie — osnova sozdaniya i ekspluatatsii slozhnykh orbital'nykh kompleksov* [Mathematical modeling — the basis of the creation and operation of complex orbital complexes] Ed. N.A. Bryukhanov, M.Yu. Belyaev. *Raketno-kosmicheskaya tekhnika* [Rocket and space technology], 2008, ser. XII, iss. 1, 191 p.
- [8] *Problemy i zadachi povysheniya effektivnosti programm issledovaniy na kosmicheskikh korablyakh i orbital'nykh stantsiyakh* [Problems and tasks of increasing the effectiveness of research programs on spacecraft and orbital stations] Ed. V.P. Legostaev, M.Yu. Belyaev. *Raketno-kosmicheskaya tekhnika* [Rocket and space technology], 2011, ser. XII, iss. 1–2, 205 p.
- [9] Belyaev M.Yu., Rulev D.N. *Optimizatsiya programmy eksperimentov pri operativnom planirovanii issledovaniy, vypolnyaemykh s KA* [Optimization of the program of experiments in the operational planning of research performed with spacecraft]. *Kosmicheskie issledovaniya* [Space Research], 1987, no. 1, pp. 30–36.
- [10] Ryumin V.V., Belyaev M.Yu. *Problems of control station on the multipurpose orbital station*. *Acta Astronautica*, 1987, v. 15, pp. 739–746.
- [11] Banit Yu.R., Belyaev M.Yu., Dobrinskaya T.A., Efimov N.I., Sazonov V.V., Stazhkov V.M. *Opreделение тензора инерции MKS по телеметрической информации* [Determination of the inertia tensor of the ISS using telemetric information]. *Kosmicheskie issledovaniya* [Space Research], 2005, v. 43, no. 2, pp. 135–146.
- [12] Belyaev M.Yu., Zavalishin D.A., Egorov N.A., Sparzhin Yu.V., Khamits I.I., Shutikov M.A., Sazonov V.V. *Opreделение массы Международной космической станции в полете* [Determination of the mass of the International Space Station in flight]. *Kosmonavtika i raketostroenie* [Cosmonautics and Rocket Science], 2005, no. 4, pp. 224–232.
- [13] Belyaev M.Yu., Zavalishin D.A. *Sposob opredeleniya massy kosmicheskoy stantsii v polete* [The method of determining the mass of the space station in flight]. Pat. 2301181 Russian Federation, IPC B64G 1/10. Prior March 24, 2005; applicant and patent holder of RSC Energia PJSC; publ. 20.06.2007, Bul. No. 17.
- [14] Sevast'yanov N.N., Branets V.N., Belyaev M.Yu., Zavalishin D.A., Platonov V.N., Banit Yu.R., Sazonov V.V. *Issledovanie vozmozhnosti upravleniya KA «Yamal-200» s ispol'zovaniem matematicheskoy modeli dvizheniya* [Study of the possibility of controlling the Yamal-200 satellite using a mathematical model of motion] XIV Sankt-Peterburgskaya Mezhdunarodnaya konferentsiya po integrirrovannym navigatsionnym sistemam, Sankt-Peterburg, TsNII «Elektropribor», 28–30 maya 2007 g. [XIV St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, St. Petersburg, Central Research Institute Elektropribor, May 28–30, 2007] St. Petersburg: Concern Central Research Institute. Electrical device, 2007, pp. 196–203.

- [15] Belyaev M.Yu., Babkin E.V., Ryabukha S.B., Ryazantsev V.V. *Mikrouskoreniya na Mezhdunarodnoy kosmicheskoy stantsii pri fizicheskikh uprazhneniyakh ekipazha* [Microaccelerations on the International Space Station during crew physical exercise]. *Kosmicheskie issledovaniya* [Space Research], 2011, v. 49, no. 2, pp. 167–181.
- [16] Belyaev M.Yu., Volkov O.N., Ryabukha S.B. *Mikrovozmushcheniya na Mezhdunarodnoy kosmicheskoy stantsii* [Micro-perturbations on the International Space Station]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii* [Space equipment and technology], 2013, no. 3, pp. 14–24.
- [17] Zavalishin D.A., Belyaev M.Yu., Sazonov V.V. *Opreделение характеристик частот упругих колебаний конструкции MKS* [Characterization of the frequencies of elastic vibrations of the ISS design]. *Kosmicheskie issledovaniya* [Space Research], 2010, v. 48, no. 4, pp. 362–370.
- [18] Monakhov M.I., Belyaev M.B., Volkov O.N. *Sposob opredeleniya deformatsii korpusa kosmicheskogo apparata v polete* [The method for determining the deformation of the spacecraft body in flight]. Pat. 2605232 Russian Federation, IPC B64G 1/22. Prior 06/15/2015; applicant and patent holder of RSC Energia PJSC; publ. 12/20/2016. Bul. No. 35.
- [19] Belyaev M.Y., Bronnikov S.V., Petrov V.M., Sekerzh-Zenkovich S.Ya. Integrated study of the iss as an environment for human-operator 'life and activities. Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC Cep. «63rd International Astronautical Congress. 2012, IAC 2012» Naples, 01–05 oktyabrya 2012 g. Agenzia Spaziale Italiana (ASI), pp. 4078–4082.
- [20] Alyamovskiy S.N., Belyaev M.Yu., Rulev D.N., Sazonov V.V., Tarasova M.M. *Sfericheskie sputniki — ot nachala kosmicheskoy ery do sovremennykh eksperimentov* [Spherical satellites — from the beginning of the space age to modern experiments] *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii* [Space equipment and technology], 2017, no. 4 (19), pp. 5–14.
- [21] Belyaev M.Yu., Rulev D.N., Alyamovskiy S.N. *Sposob opredeleniya plotnosti atmosfery na vysote poleta kosmicheskogo apparata* [The method of determining the density of the atmosphere at the altitude of the spacecraft]. Pat. 2016150068 Russian Federation, IPC B64G 3/00. Prior. 12/19/2016; applicant and patent holder of RSC Energia PJSC; publ. 06/20/2018. Bul. No. 17.
- [22] Mikrin E.A., Belyaev M.Yu., Borovikhin P.A., Karavaev D.Yu. *Otrabotka na MKS tekhnologii avtonomnoy navigatsii s pomoshch'yu s'emok ekipazha dlya zadachi obleta Luny* [Testing autonomous navigation technology on the ISS using crew surveys for the task of circling the moon] XXV Sankt-Peterburgskaya Mezhdunarodnaya konferentsiya po integrirovannym navigatsionnym sistemam [XXV St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems], St. Petersburg, Central Research Institute Elektropribor, May 28–30, 2018. St. Petersburg: Institute of Electrical Instruments, 2018, pp. 7–13.
- [23] Belyaev M.Yu., Matveeva T.V., Rulev D.N. *Vozmozhnye tekhnologii upravleniya transportnymi gruzovymi korablyami «Progress» pri provedenii eksperimentov v avtonomnom polete* [Possible technologies for the management of transport cargo ships «Progress» when conducting experiments in autonomous flight] *Girokopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and navigation], 2017, v. 25, no. 3 (98), pp. 32–48.
- [24] Belyaev M.Yu., Borovikhin P.A., Karavaev D.Yu., Rulev D.N. *Upravlenie podvizhnymi platformami pri navedenii nauchnoy apparatury na izuchaemye ob'ekty v eksperimente «Uragan» na Mezhdunarodnoy kosmicheskoy stantsii* [Managing mobile platforms while hovering scientific equipment on objects under study in the Uragan experiment on the International Space Station] XXIV Sankt-Peterburgskaya Mezhdunarodnaya konferentsiya po integrirovannym navigatsionnym sistemam [XXIV St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems], St. Petersburg, Central Research Institute Elektropribor, May 29–31, 2017. St. Petersburg: Concern OJSC of the Central Research Institute Elektropribor, 2017, pp. 44–47.
- [25] Belyaev M.Yu., Desinov L.V., Karavaev D.Yu., Sarmin E.E., Yurina O.A. *Apparatura i programmno-matematicheskoe obespechenie dlya izucheniya zemnoy poverkhnosti s borta rossiyskogo segmenta Mezhdunarodnoy kosmicheskoy stantsii po programme «Uragan»* [Equipment and software for the study of the earth's surface from the Russian segment of the International Space Station under the Uragan program] *Kosmonavtika i raketostroenie* [Astronautics and Rocket Engineering], 2015, no. 1, pp. 63–70.
- [26] Belyaev M.Y., Cheremisin M.V., Esakov A.M. Integrated monitoring of earth surface from onboard ISS Russian segment. 69th International Astronautical Congress («IAC 2018 — involving everyone»), Bremen, Germany, Center of Applied Space Technology and Microgravity, 1–5 October 2018. Published by the IAF, pp. 1–9.
- [27] Belyaev M.Yu., Vikel'ski M., Lampen M., Legostaev V.P., Myuller U., Naumann V., Tertitskiy G.M., Yurina O.A. *Tekhnologiya izucheniya peremeshcheniya zhivotnykh i ptits na Zemle s pomoshch'yu apparatury ICARUS na rossiyskom segmente MKS* [Technology of studying the movement of animals and birds on Earth using ICARUS equipment on the Russian segment of the ISS] *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii* [Space equipment and technology], 2015, no. 3, pp. 38–51.
- [28] Mikrin E.A., Belyaev M.Yu. *Pilotiruemaya kosmonavtika — osnova dlya razvitiya raketno-kosmicheskoy tekhniki* [Piloted cosmonautics — the basis for the development of rocket and space technology] *Trudy LI Nauchnykh chteniy K.E. Tsiolkovskogo. Sektsiya «Problemy raketnoy i kosmicheskoy tekhniki»* [Works of LI Scientific readings of K.E. Tsiolkovsky. Section «Problems of rocket and space technology»], Kazan, September 20–22, 2016. Kazan: KSTU, 2017, pp. 5–15.

Author's information

Belyaev Mikhail Yur'evich — Dr. Sci. (Tech.), Professor, Deputy Head of the Scientific and Technical Center of RSC Energia, mikhail.belyaev@rsce.ru

Received 19.04.2019.

Accepted for publication 15.07.2019.

УЧАСТИЕ ФЭСТ В РЕШЕНИИ ИНЖЕНЕРНЫХ И НАУЧНЫХ ЗАДАЧ КОСМОНАВТИКИ (К 60-летию ФАКУЛЬТЕТА ЭЛЕКТРОНИКИ И СИСТЕМОТЕХНИКИ МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА ЛЕСА)

А.В. Корольков¹, Н.В. Ефремов¹, В.Б. Сапожников², Ю.М. Новиков³,
В.А. Большаков³, Л.Г. Александров⁴, С.Б. Константинов⁴, И.С. Партола⁵

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

²ООО НТВЦ «ЭДУКОН», 141090, Московская обл., г. Королев, ул. Пионерская, д. 1/4

³ЗАО «ЦВТМ» при МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1

⁴ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина, 141400, Московская обл., г. Химки, ул. Ленинградская, д. 24

⁵ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», 125438, Москва, ул. Онежская, д. 8

korolkov@mgul.ac.ru

Представлены некоторые результаты совместной деятельности сотрудников факультета электроники и системотехники и работников других организаций и предприятий в области решения инженерных задач и научных проблем космической отрасли с момента открытия факультета (1959 г.) по настоящее время. Основные представленные результаты были получены в области изучения особенностей поведения жидкости в условиях, близких к невесомости, в исследовании остаточных ускорений на борту космического аппарата, в технических проблемах подачи жидкого топлива в двигательную установку, в изучении кипения в невесомости.

Ключевые слова: ФЭСТ, режимы функционирования космического аппарата, «Салют-7», «Мир», космический эксперимент

Ссылка для цитирования: Корольков А.В., Ефремов Н.В., Сапожников В.Б., Новиков Ю.М., Большаков В.А., Александров Л.Г., Константинов С.Б., Партола И.С. Участие ФЭСТ в решении инженерных и научных задач космонавтики (к 60-летию факультета электроники и системотехники Московского государственного университета леса) // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2019. Т. 23. № 4. С. 14–22. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-14-22

Современная ракетно-космическая техника предъявляет особо жесткие требования к качеству решения инженерных задач. Факультет ФЭСТ, созданный 60 лет назад академиком С.П. Королевым готовит специалистов для предприятий ракетно-космической отрасли. Все эти годы работники предприятий и специалисты различных научно-технических направлений с привлечением сотрудников факультета проводят совместные научные и инженерные исследования по различным проблемам космической отрасли. Исследовательский коллектив в разное время включал в себя преподавателей, аспирантов и студентов ФЭСТ, сотрудников МГТУ им. Н.Э. Баумана, ЦНИИмаш, РКК «Энергия» им. С.П. Королева», КБ «Салют» им. М.В. Хруничева, СКБ им. С.А. Лавочкина, НИИ-4, «ЭКА», ООО НТВЦ «ЭДУКОН», ГНЦ РФ ФЭИ им. А.И. Лейпунского, ИПМех, ИФЗ и многих других предприятий и учреждений. В результате выполнения этих работ был получен ряд важных и интересных результатов.

Первые технологические эксперименты по выращиванию кристаллов в условиях невесомости на орбитальной станции «Салют-6» дали неожиданные результаты: малые остаточные ускорения на борту космического аппарата, исследованные, например, авторами работы [1], могут вызывать

конвективные движения, интенсивность которых выше, чем в земных условиях.

Цель работы

Цель работы — подвести некоторый промежуточный итог многолетней совместной деятельности факультета с предприятиями и организациями космической отрасли. В статье затронута лишь одно из направлений научных работ, выполняемых на факультете — это работы, посвященные изучению поведения жидкости в условиях реального космического полета.

Технологические эксперименты в невесомости

С открытием кафедры прикладной математики в 1985 г. на ФЭСТ начались работы по вычислительной гидродинамике. Совместно с сотрудниками ФГУП «ЦНИИмаш» (г. Королев Московской обл.) на передовой (по тому времени) вычислительной технике проводились вычислительные эксперименты, на основании которых было дано объяснение явления увеличения интенсивности конвективного движения в условиях реального космического полета [2] (рис. 1). Установлено также, что увеличение интенсивности конвективного движения жидкости в сосуде вызывается непрерывным изменением направления вектора

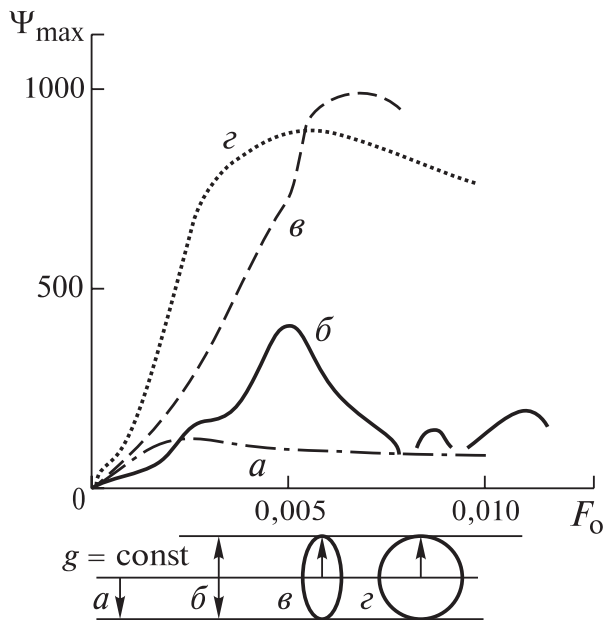


Рис. 1. Интенсивность конвективного течения (максимальное значение безразмерной функции тока) во времени в зависимости от закона изменения вектора ускорения: *a* — постоянное направление вектора ускорения, *b* — изменение только в вертикальном направлении, *v*, *z* — вращение вектора ускорения с переменной и постоянной длиной вектора), безразмерная угловая скорость вращения равна 1572

Fig. 1. The intensity of the convective flow (the maximum value of the dimensionless stream function) in time depending on the law of change of the acceleration vector: *a* — constant direction of the acceleration vector, *b* — change only in the vertical direction, *v*, *z* — rotation of the acceleration vector with a variable and constant vector length), the dimensionless angular velocity of rotation is 1572

остаточного ускорения. Режим движения жидкости определяется соотношением времени развития конвекции ($Pr \sqrt{Gr}$) [3], где число Грасгофа Gr определяется по значению модуля остаточного ускорения) и времени скорости изменения направления вектора ускорения (например, период обращения вектора ускорения).

Таким образом, возникла необходимость изучения состояния, близкого к невесомости, для определения параметров остаточных ускорений в условиях реального космического полета.

Состояние, близкое к невесомости

Проведена серия научных работ по натурному (непосредственно на космических аппаратах — КА), экспериментальному (на Земле), аналитическому и численному изучению остаточных ускорений при различных режимах функционирования КА [4–6] (рис. 2).

Данные, представленные на рис. 2, указывают на эволюционный характер изменения вектора ускорения, т. е. плавное непрерывное изменение модуля и направления вектора ускорения.

Аналогичные результаты получены в ходе изучения остаточных ускорений на борту станций «Салют-7» и «Мир». В расчетах и при непосредственных измерениях выделены несколько диапазонов частот изменения направления вектора местного ускорения, обусловленного возмущающим воздействием различных факторов, сопровождающих космический полет. Причем характер поведения вектора ускорения зависел не только от режима функционирования КА, но и от места проведения измерений на борту.

Эти исследования дали возможность оценивать наиболее «опасные» с точки зрения воздействия на гидродинамическую систему режимы функционирования КА и планировать «безопасное» время и место проведения гравитационно-зависимых экспериментов.

В настоящее время работы по изучению поведения гидродинамических систем в условиях реального полета КА продолжают уточняться критерии возникновения различных режимов движения для более сложных гидродинамических систем (например, слоистых систем [7, 8], систем жидкость — газ [9] и т. д.) и определяются параметры микроускорений для КА различных конфигураций и различных режимов функционирования. Такие работы необходимы не только для космических технологических процессов, но и для экспериментов, поскольку гидродинамическими системами являются также пространства отсеков космических станций, компоненты системы жизнеобеспечения и компоненты различных технических устройств.

Подача жидкого топлива в двигательную установку

Важное значение имеют исследования поведения гидродинамической системы жидкость — газ. Топливные баки двигательной установки КА частично заполнены компонентами жидкого топлива. При запуске двигателя в условиях невесомости необходимо обеспечить бесперебойную подачу жидкого топлива в заборное устройство, связывающее бак с расходной магистралью, и не допустить попадания туда газа наддува. Эта задача становится особенно острой, когда в баке остается мало жидкости.

В соответствии с требованиями долгосрочной эксплуатации КА [10] система подачи жидкого топлива в двигательную установку должна гарантировать выработку практически всего его объема при выполнении операций в соответствии с циклограммой полета. Невырабатываемый остаток жидкого топлива не должен превышать 1 % начального объема. Для обеспечения этих требований создаются различные внутрибаковые конструкции. Общие подходы к их созданию

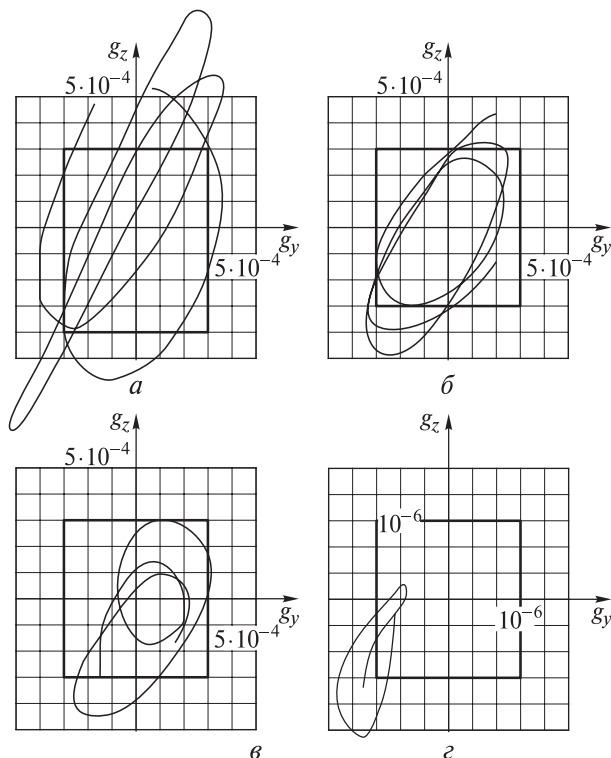


Рис. 2. Характерные эволюции вектора ускорения на станции «Салют-6» (а–в) и аппарате Space Shuttle (STS-40) (z); плавный останов оператора на дорожке комплексного тренажера физического (КТФ) после бега: а — 6–7 с, б — 12–13 с, в — 19–20 с, z — аэродинамическое сопротивление — спортивный снаряд на станции «Салют-6»)

Fig. 2. The characteristic evolution of the acceleration vector at the Salyut-6 station (a–v) and Space Shuttle (STS-40) (z); smooth stop of the operator on the track of the complex physical simulator (CTF) after running: a — 6–7 s, б — 12–13 s, в — 19–20 s, z — aerodynamic drag — sports equipment at the Salyut-6 station)

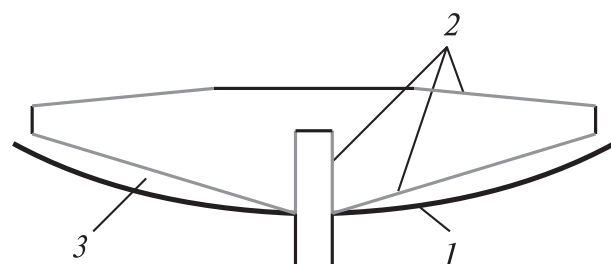


Рис. 3. Типичная форма фазоразделительного устройства для бака со сферическим дном: 1 — стенка бака; 2 — фазоразделительные экраны; 3 — капиллярный зазор

Fig. 3. A typical form of a phase separation device for a tank with a spherical bottom: 1 — tank wall; 2 — phase separation screens; 3 — capillary gap

сформулированы в работе [11]. Непосредственно на входе в расходную магистраль устанавливаются фазоразделительные устройства (ФЗУ), которые представляют собой систему фазоразделительных экранов, отделяющих жидкое топливо,

находящееся непосредственно около заборного устройства, от газовой фазы в основном объеме топливного бака. Конфигурация системы экранов может быть самой разнообразной, в зависимости от назначения двигателей, их мощностей, форм топливных баков, циклограмм полета и других факторов. Например, для торообразного топливного бака разгонного блока «Бриз-М» использовались ФЗУ тороидальной формы [12, 13], для топливных баков со сферическим дном — ФЗУ в различных формах, образующих капиллярный зазор с дном (рис. 3).

Фазоразделительные экраны изготавливаются из комбинированных пористо-сетчатых материалов (КПСМ), обладающих объемными капиллярными свойствами и характеризующих капиллярной удерживающей способностью (КУС), т. е. максимальным перепадом давления, при котором газовая фаза не проходит через фазоразделитель, и потерей давления Δp при прохождении жидкости сквозь фазоразделитель:

$$\Delta p = \zeta \frac{\rho \cdot u^2}{2},$$

где ζ — коэффициент гидродинамического сопротивления; ρ — плотность жидкости; u — скорость газожидкостного потока по нормали к поверхности фазоразделителя [14]. Капиллярная удерживающая способность и коэффициент гидродинамического сопротивления определяются экспериментально.

В целях удержания жидкости около ФЗУ используют внутрибаковые устройства капиллярного типа (ВБУ КТ), например, устройство топливного бака и ВБУ КТ космического аппарата «Интергелиозонд» (рис. 4).

Факультет работает в кооперации с разработчиками топливных баков и ВБУ (КБ «Салют» им. М.В. Хруничева, НПО им. С.А. Лавочкина), разработчиками и изготовителями КПСМ («ЦВТМ»), организацией, проводящей лабораторные испытания моделей баков и ВБУ («ЭДУКОН»). В задачи сотрудников ФЭСТ входит математическое моделирование гидродинамических процессов, происходящих в топливном баке при различных режимах функционирования КА [15–21]. Цель этих работ заключается в оценке работоспособности и эффективности разрабатываемого технического устройства и выработке рекомендаций по коррекции его параметров и режимов эксплуатации.

Кипение в невесомости

В решении еще одной важной проблемы участвуют сотрудники ФЭСТ: возможен ли пузырьковый режим кипения в условиях невесомости?

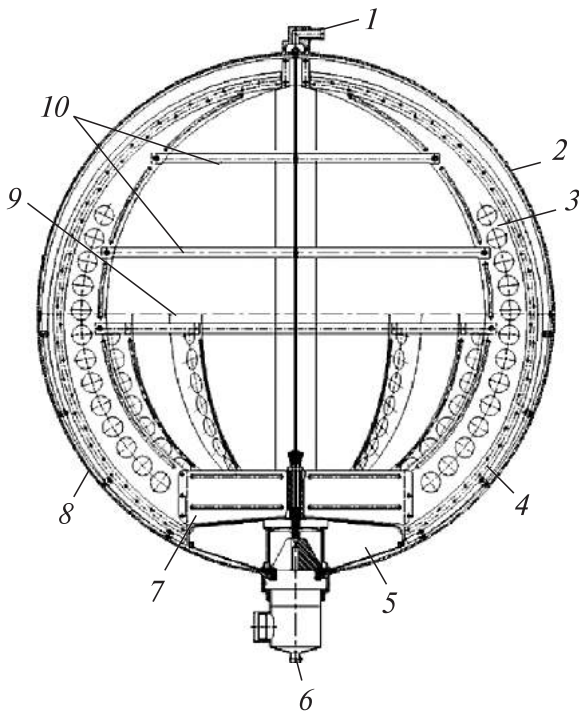


Рис. 4. Топливный бак с внутрибаковым устройством капиллярного типа: 1 — корпус бака; 2 — заправочно-сливной штуцер; 3 — наддувный штуцер; 4 — фазоразделительное устройство; 5 — перегородки верхние; 6 — транспортные желоба; 7 — плоские удерживающие перегородки; 8 — конструктивные рамы; 9 — перегородки нижние; 10 — секторные капиллярные элементы

Fig. 4. A fuel tank with an internal tank capillary type device: 1 — tank body; 2 — filling and drain fitting; 3 — pressurized fitting; 4 — phase separation device; 5 — upper partitions; 6 — shoots; 7 — flat retaining partitions; 8 — structural frames; 9 — lower partitions; 10 — sector capillary elements

Для работы различных технических систем используют теплообменные аппараты. Наиболее эффективные из них работают по принципу фазового перехода (кипения) теплоносителя. В соответствии с классической формулой Кутателадзе, в условиях, близких к невесомости, кипение должно протекать в пленочном режиме.

Ученые АО ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского (г. Обнинск), моделируя кипение в жидкости на горизонтальном проволочном нагревателе, установили, что иногда паровые пузыри «отстреливали» от нагревателя не вверх, в соответствии с действием сил плавучести, а в сторону или даже вниз [22]. Это свидетельствовало о том, что существует иной, отличный от сил плавучести, но заложенный в основу формулы Кутателадзе, механизм отрыва парового пузыря от нагревателя. По инициативе ученых ФЭИ была организована рабочая группа, в состав которой вошли сотрудники ФЭСТ и НИИ ПММ при МГТУ им. Н.Э. Баумана, для изучения этого механизма.

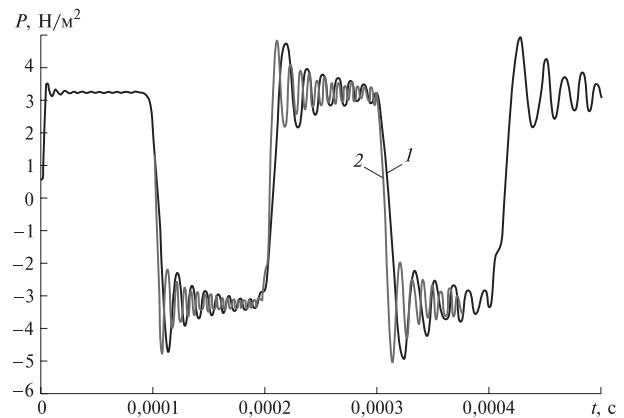


Рис. 5. Волны сжатия и разрежения, возникающие при нагреве жидкости на поверхности нагревателя для воды с начальной температурой 20 °С (плотность теплового потока $q = 10^4$ Вт/м², глубина заполнения (высота столба) $L = 0,05$ м)

Fig. 5. Compression and rarefaction waves that occur when liquid is heated on the surface of a water heater with an initial temperature of 20 °С (heat flux density $q = 10^4$ W/m², filling depth (column height) $L = 0,05$ m)

В работах [23, 24] изложены результаты физического обоснования негравитационного механизма отрыва парового пузыря от нагревателя и численного моделирования этого процесса. Сжимаемый паровый пузырь можно рассматривать как пружину, а массу окружающей жидкости — как груз. Такая механическая модель не только позволила объяснить физический смысл явления, но и получить при проведении вычислительного эксперимента количественные критерии возможности возникновения пузырькового режима кипения в невесомости.

Параллельно с изучением физики такого сложного явления, как кипение была решена задача о шуме, возникающем при нагреве воды. В классической книге Несиса [25] его связывают с недогретым кипением и объясняют схлопыванием паровых пузырьков в недогретой жидкости. Простой бытовой эксперимент опровергает это. Если налить холодную воду в электрический чайник до отметки min и включить его, через некоторое время будет слышно характерное шипение. С течением некоторого времени интенсивность шипения стабилизируется, тогда следует долить холодную воду до отметки max. Через несколько секунд шипение снова возобновится, но тон его будет более низким, не высоким, как это могло следовать из предположения о том, что звук исходит от схлопывающихся пузырьков пара, поскольку в более холодной воде размеры пузырьков должны быть меньше.

Простое экспериментальное вычисление [26] показывает, что звук появляется от температурного расширения нагреваемой жидкости.

Волна сжатия доходит от нагревателя до свободной поверхности, от которой отражается волна разрежения, останавливающая движение жидкости в сторону свободной поверхности (рис. 5). Учитывая значение скорости звука в воде, легко подсчитать частоту колебаний давления, которая хорошо согласуется с данными эксперимента. Эта модель источника звука объясняет, почему при добавлении воды в чайник тон шума понижается — увеличивается расстояние от нагревателя до свободной поверхности.

В 2000 г. была подана заявка от ФЭСТ и НИИ ПММ МГТУ им. Н.Э. Баумана на проведение космического эксперимента на МКС под названием «Кипение». Заявка прошла конкурсный отбор, и проведение космического эксперимента было принято к выполнению на российском сегменте Международной космической станции (МКС) секцией № 1 координационного научно-технического совета (КНТС) Роскосмоса и ФИК РАН НИЦ «Космическое материаловедение» 28.12.2000 г. В 2014 г. к постановщикам эксперимента присоединился коллектив НТВЦ «ЭДУКОН». В настоящее время эксперимент не реализован, однако теоретические исследования и изучение этого явления продолжаются.

Выводы

Есть основание полагать [27], что пузырьковый режим кипения в невесомости можно реализовать, а также можно создать эффективные теплообменные устройства, работающие в условиях невесомости.

Список литературы

- [1] Гришин С.Д., Дубовской В.Б., Обьедников С.С., Савичев В.В. Исследование малых ускорений на борту орбитальной научной станции «Салют-6» // Технологические эксперименты в невесомости / под ред. В.А. Брискмана. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1983. С. 6–14.
- [2] Авдеевский В.С., Корольков А.В., Купцова В.С., Савичев В.В. Исследование тепловой гравитационной конвекции в переменном поле вектора малых ускорений // ПМТФ, 1987. № 1. С. 54–59.
- [3] Темам Р. Уравнения Навье-Стокса. Теория и численный анализ. М.: Мир, 1981. 408 с.
- [4] Беляев М.Ю., Зыков С.Г., Рябуха С.Б., Сазонов В.В., Сарычев В.А., Стажков В.М. Математическое моделирование и измерение микроускорений на орбитальной станции «Мир» // Известия РАН. Механика жидкости и газа, 1994. № 5. С. 5–14.
- [5] Авдеевский В.С., Лиходед А.И., Савичев В.В. Пространственная эволюция вектора остаточных ускорений на борту космических аппаратов // Космические исследования, 1988. Т. 26. № 4. С. 621–625.
- [6] Ветошкин А.М., Домашев В.Ф., Корольков А.В., Рябуха С.Б., Савичев В.В. Анализ малых ускорений на борту орбитальных научных станций с точки зрения воздействия на гидродинамические системы // Космические исследования, 1998. Т. 36. № 2. С. 221–224.
- [7] Savitchev V.V., Korolkov A.V., Vetoshkin A.M. Computer Simulation of Initial Phase of Immiscible Liquid System Thermocapillary Motion // Space Forum, 1999, v. 4, pp. 307–319.
- [8] Ветошкин А.М., Корольков А.В., Сапожников В.Б. Взаимодействие системы жидкость — газ с фазоразделительными сетками // Обзорение прикладной и промышленной математики, 2017. Т. 24. № 4. С. 315–320.
- [9] Сапожников В.Б., Корольков А.В. Отделение газа от жидкости в потоке газожидкостной смеси в условиях невесомости с помощью комбинированных пористо-сетчатых материалов // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии, 2014. № 1 (14). С. 60–65.
- [10] Александров А.А., Хартов В.В., Новиков Ю.М., Крылов В.И., Ягодников Д.А. Современное состояние и перспективы разработки капиллярных топливозаборных устройств из комбинированных пористо-сетчатых материалов для космических аппаратов с длительным сроком активного существования // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, 2015. № 6(105). С. 130–142.
- [11] Корольков А.В., Меньшиков В.А., Партола И.С., Сапожников В.Б. Развитие идей профессора В.М. Поляева по применению пористо-сетчатых материалов для внутрибаковых устройств, обеспечивающих многократный запуск ЖРД космических аппаратов и разгонных блоков в условиях свободного и возмущенного орбитального и суборбитального полета // Тр. Всерос. науч.-техн. конф. «Ракетно-космические двигательные установки», посвященной 80-летию со дня рождения заслуженных деятелей науки и техники РФ лауреатов Государственной премии СССР профессоров В.М. Кудрявцева и В.М. Поляева, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 18–19 октября 2018 г. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. С. 17–18.
- [12] Сапожников В.Б., Корольков А.В., Авраамов Н.И. Влияние времени выхода на режим маршевого ЖРД на процесс опорожнения топливного бака летательного аппарата в условиях свободного орбитального полета // Наука и образование, 2015. № 11. С. 603–617
- [13] Корольков А.В., Партола И.С., Сапожников В.Б. Теоретические основы разработки и экспериментальной отработки капиллярных заборных устройств с минимальными остатками топлива. Научно-технические разработки ОКБ-23 – КБ «Салют». М.: Воздушный транспорт, 2006. С. 313–320.
- [14] Сапожников В.Б., Корольков А.В. Отделение газа от жидкости в потоке газожидкостной смеси в условиях невесомости с помощью комбинированных пористо-сетчатых материалов // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии, 2014, № 1 (14). С. 60–65.
- [15] Сапожников В.Б., Меньшиков В.А., Партола И.С., Корольков А.В. Развитие идей профессора В.М. Поляева по применению пористо-сетчатых материалов для внутрибаковых устройств, обеспечивающих многократный запуск жидкостных ракетных двигателей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, 2006, № 2 (63). С. 78–83.
- [16] Корольков А.В., Сапожников В.Б. Некоторые задачи прикладной промышленной математики в инженерном обеспечении космических полетов // Обзорение прикладной и промышленной математики, 2016. Т. 23. № 4. С. 363–366.
- [17] Сапожников В.Б., Гришко Я.П., Корольков А.В., Большаков В.А., Новиков Ю.М., Константинов С.Б., Мартынов М.Б. Применение комбинированных пори-

- сто-сетчатых материалов в конструкции внутрибаковых устройств двигательных установок космических аппаратов, верхних ступеней ракет-носителей и разгонных блоков // *Материалы XIV Междунар. науч. конф., посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева*, 10–12 ноября 2010, г. Красноярск. В 2-х ч. Ч. 1. Красноярск: СибГАУ им. акад. М.Ф. Решетнева, 2010. С. 126.
- [18] Сапожников В.Б., Гришко Я.П., Корольков А.В., Большаков В.А., Новиков Ю.М., Константинов С.Б., Мартынов М.Б. Применение комбинированных пористо-сетчатых материалов в конструкции внутрибаковых устройств двигательных установок космических аппаратов, верхних ступеней ракет-носителей и разгонных блоков // *Вестник СибГАУ им. акад. М.Ф. Решетнева*, 2011. Вып. 3 (36). С. 122–126.
- [19] Корольков А.В., Сапожников В.Б. Расчетно-теоретическая и экспериментальная оценка работоспособности комбинированных пористо-сетчатых материалов в качестве капиллярных заборных устройств топливных баков жидкостных ракетных двигательных установок // *Тез. докл. 11-й Междунар. конф. «Авиация и космонавтика–2012»*. Москва, МАИ (НИУ), 13–15 ноября 2012 г. СПб.: Мастерская печати, 2012. 412 с. С. 220–221.
- [20] Корольков А.В., Королькова Л.В., Сапожников В.Б., Маслов В.А. Оценка объема жидкости в телесных углах транспортных желобов топливного бака космического аппарата // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2018. Т. 22. № 2. С. 120–124.
DOI: 10.18698/2542-1468-2018-2-120-124
- [21] Корольков А.В., Сапожников В.Б., Ефремов Н.В. Динамика жидкости в фазоразделительном устройстве в период опорожнения топливного бака космического аппарата // *Обзорные прикладной и промышленной математики*, 2018. Т. 25. Вып. 3. С. 255–258.
- [22] Исследование динамики паровых пузырьков при кипении воды на тонких проволоках в условиях естественной конвекции / В.И. Субботин, С.П. Казановский, С.К. Коротаев, В.Е. Свириденко, Ю.Ф. Селиванов // *Атомная энергия*, 1970. Т. 28, Вып. 1. С. 9–13.
- [23] Савичев В.В., Корольков А.В., Ветошкин А.М. О гидродинамике пузырькового кипения в невесомости // *Тр. 2-й Рос. нац. конф. по теплообмену*. В 8 т. Т. 4. Кипение, кризисы кипения, закризисный теплообмен. Испарение, конденсация. М.: МЭИ, 1998. С. 206–209.
- [24] Корольков А.В., Коротаев С.К., Савичев В.В., Свириденко И.П. Исследование механизма отрыва паровой фазы при поверхностном кипении жидкости // *Поверхность, рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, 2001. № 9. С. 90–95.
- [25] Несис Е.И. Кипение жидкостей. М.: Наука, 1973. 280 с.
- [26] Сапожников В.Б., Авраамов Н.И. Условия разрушения газовых полостей в жидкости при переходе от невесомости к кратковременному воздействию // *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017. Вып. 2 (62). С. 1.
- [27] Сапожников В.Б., Корольков А.В. Математическое моделирование процессов кипения в невесомости // *Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии*, 2015. Вып. 1 (16). С. 61–66.

Сведения об авторах

Корольков Анатолий Владимирович — д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Прикладная математика, информатика и вычислительная техника», МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), korolkov@mgul.ac.ru

Ефремов Николай Владимирович — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), efremov@mgul.ac.ru

Сапожников Владимир Борисович — д-р техн. наук, генеральный директор ООО НТВЦ «ЭДУКОН», edukon@yandex.ru

Новиков Юрий Михайлович — канд. техн. наук, нач. отдела ЗАО «ЦВТМ» при МГТУ им. Н.Э. Баумана, nolab@power.bmstu.ru

Большаков Владимир Андреевич — инженер ЗАО «ЦВТМ» при МГТУ им. Н.Э. Баумана, nolab@power.bmstu.ru

Александров Лев Григорьевич — начальник сектора ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина, nrol@laspace.ru

Константинов Сергей Борисович — канд. техн. наук, ведущий конструктор ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина, nrol@laspace.ru

Партола Игорь Станиславович — зам. начальника отдела ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», kerc@elnet.msk.ru

Поступила в редакцию 19.04.2019.

Принята к публикации 15.07.2019.

PARTICIPATION OF FACULTY OF ELECTRONICS AND SYSTEMS ENGINEERING IN SOLVING ENGINEERING AND SCIENTIFIC ISSUES OF COSMONAUTICS (TO THE 60th ANNIVERSARY OF THE FACULTY OF ELECTRONICS AND SYSTEMS ENGINEERING OF THE MOSCOW STATE FOREST UNIVERSITY)

A.V. Korol'kov¹, N.V. Efremov¹, V.B. Sapozhnikov², Yu.M. Novikov³,
V.A. Bol'shakov³, L.G. Aleksandrov⁴, S.B. Konstantinov⁴, I.S. Partola⁵

¹BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institut'skaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

²EDUKON, 1/4, Pioneer st., 141090, Korolev, Moscow reg., Russia

³TSVTM at BMSTU, 5, 2nd Baumanskaya st., 105005, Moscow, Russia

⁴NPO them. S.A. Lavochkina, 24, Leningradskaya st., Khimki, 141400, Moscow reg., Russia

⁵State Research Center FSUE «Keldysh Center», 8, Onezhskaya st., 125438, Moscow, Russia

korolkov@mgul.ac.ru

Some results of joint activity of employees of FESE and employees from other organizations and enterprises in the field of the solution of engineering tasks and scientific issues of the space industry are presented from the moment of the faculty opening (1959) till present. The main results were received in the field of studying of features of behavior of liquid in the conditions close to zero gravity, in a research of residual accelerations onboard of spacecraft, in technical problems of supply of liquid fuel in the propulsion system, in studying of boiling in zero gravity.

Keywords: FEST, spacecraft operation modes, Salyut-7, Mir, space experiment

Suggested citation: Korol'kov A.V., Efremov N.V., Sapozhnikov V.B., Novikov Yu.M., Bol'shakov V.A., Aleksandrov L.G., Konstantinov S.B., Partola I.S. *Uchastie FEST v reshenii inzhenernykh i nauchnykh zadach kosmonavtiki (k 60-letiyu fakul'teta elektroniki i sistemotekhniki Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa)* [Participation of Faculty of Electronics and Systems Engineering in solving engineering and scientific issues of cosmonautics (to the 60th anniversary of the Faculty of Electronics and Systems Engineering of the Moscow State Forest University)]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 4, pp. 14–22. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-14-22

References

- [1] Grishin S.D., Dubovskoy V.B., Obydenikov S.S., Savichev V.V. *Issledovanie malykh uskoreniy na bortu orbital'noy nauchnoy stantsii «Salyut-6»* [Study of small accelerations onboard the Salyut-6 orbital scientific station] *Tekhnologicheskie eksperimenty v nevesomosti* [Technological experiments in zero gravity]. Ed. V.A. Briskman. Sverdlovsk: UC USSR Academy of Sciences, 1983, pp. 6–14.
- [2] Avduevskiy V.S., Korol'kov A.V., Kuptsova V.S., Savichev V.V. *Issledovanie teplovy gravitatsionnoy konveksii v peremennom pole vektora malykh uskoreniy* [Study of thermal gravitational convection in a variable field of a vector of small accelerations]. *PMTF*, 1987, no. 1, pp. 54–59.
- [3] Temam R. *Upravneniya Nav'e-Stoksa. Teoriya i chislennyi analiz* [Equations Navier-Stokes. Theory and numerical analysis]. Moscow: Mir, 1981, 408 p.
- [4] Belyaev M.Yu., Zykov S.G., Ryabukha S.B., Sazonov V.V., Sarychev V.A., Stazhkov V.M. *Matematicheskoe modelirovanie i izmerenie mikrouskoreniy na orbital'noy stantsii «Mir»* [Mathematical modeling and measurement of micro-accelerations at the Mir orbital station] *Izvestiya RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza* [Izvestia RAN. Fluid and gas mechanics], 1994, no. 5, pp. 5–14.
- [5] Avduevskiy V.S., Likhoded A.I., Savichev V.V. *Prostranstvennaya evolyutsiya vektora ostatochnykh uskoreniy na bortu kosmicheskikh apparatov* [Spatial evolution of the vector of residual accelerations onboard spacecraft] *Kosmicheskie issledovaniya* [Space research], 1988, v. 26, no. 4, pp. 621–625.
- [6] Vetoshkin A.M., Domashev V.F., Korol'kov A.V., Ryabukha S.B., Savichev V.V. *Analiz malykh uskoreniy na bortu orbital'nykh nauchnykh stantsiy s tochki zreniya vozdeystviya na gidrodinamicheskie sistemy* [Analysis of small accelerations onboard orbital research stations in terms of their impact on hydrodynamic systems] *Kosmicheskie issledovaniya* [Space Research], 1998, v. 36, no. 2, pp. 221–224.
- [7] Savichev V.V., Korolkov A.V., Vetoshkin A.M. *Computer Simulation of Initial Phase of Immiscible Liquid System Thermo-capillary Motion*. *Space Forum*, 1999, v. 4, pp. 307–319.
- [8] Vetoshkin A.M., Korol'kov A.V., Sapozhnikov V.B. *Vzaimodeystvie sistemy zhidkost' — gaz s fazorazdelitel'nymi setkami* [Sapozhnikov Interaction of a liquid-gas system with phase separation grids] *Obozrenie prikladnoy i promyshlennoy matematiki* [Review of Applied and Industrial Mathematics], 2017, v. 24, no. 4, pp. 315–320.
- [9] Sapozhnikov V.B., Korol'kov A.V. *Otdelenie gaza ot zhidkosti v potoke gazozhidkostnoy smesi v usloviyakh nevesomosti s pomoshch'yu kombinirovannykh poristo-setchatykh materialov* [Separation of gas from liquid in a gas-liquid mixture flow in zero gravity using combined porous-mesh materials] *Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezul'taty, tekhnologii* [Modern Science: Research, Ideas, Results, Technology], 2014, no. 1 (14), pp. 60–65.
- [10] Aleksandrov A.A., Khartov V.V., Novikov Yu.M., Krylov V.I., Yagodnikov D.A. *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razrabotki kapillyarnykh toplivozabornykh ustroystv iz kombinirovannykh poristo-setchatykh materialov dlya kosmicheskikh apparatov s dliatel'nym srokom aktivnogo sushchestvovaniya* [The current state and prospects for the development of capillary fuel-intake devices from combined porous-mesh materials for spacecraft with a long active life period] *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya «Mashinostroenie»* [Vestnik of Moscow State Technical University. N.E. Bauman. Series «Engineering»], 2015, no. 6 (105), pp. 130–142.

- [11] Korol'kov A.V., Men'shikov V.A., Partola I.S., Sapozhnikov V.B. *Razvitie idey professora V.M. Polyayeva po primeneniyu poristo-setchatykh materialov dlya vnutribakovykh ustroystv, obespechivayushchikh mnogokratnyy zapusk ZhRD kosmicheskikh apparatov i razgonnykh blokov v usloviyakh svobodnogo i vozmushchennogo orbital'nogo i suborbital'nogo poleta*. [The development of ideas of Professor V.M. Polyayev on the use of porous-mesh materials for in-tank devices ensuring multiple launching of rocket engines of spacecraft and accelerating units in a free and disturbed orbital and suborbital flight] Trudy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Raketno-kosmicheskie dvigatel'nye ustanovki», posvyashchennoy 80-letiyu so dnya rozhdeniya Zasluzhennykh deyatel'nykh nauki i tekhniki RF, laureatov Gosudarstvennoy premii SSSR, professorov V.M. Kudryavtseva i V.M. Polyayeva [The birthday of Honored Workers of Science and Technology of the Russian Federation, laureates of the USSR State Prize, professors V.M. Kudryavtseva and V.M. Polyayeva]. Moscow, BMSTU. October 18–19, 2018. Moscow: BMSTU, 2005, pp. 17–18.
- [12] Sapozhnikov V.B., Korol'kov A.V., Avraamov N.I. *Vliyanie vremeni vykhoda na rezhim marshevogo ZhRD na protsess oporozhneniya toplivnogo baka letatel'nogo apparata v usloviyakh svobodnogo orbital'nogo poleta* [Influence of the time to enter the marching LRE mode on the process of emptying the fuel tank of an aircraft in a free orbital flight] Nauka i obrazovanie [Science and Education], 2015, no. 11, pp. 603–617.
- [13] Korol'kov A.V., Partola I.S., Sapozhnikov V.B. *Teoreticheskie osnovy razrabotki i eksperimental'noy otrabotki kapillyarnykh zabornykh ustroystv s minimal'nymi ostatkami topliva. Nauchno-tekhnicheskie razrabotki OKB-23 – KB «Salyut»* [Theoretical basis for the development and experimental testing of capillary intake devices with minimal fuel residues. Scientific and technical development of OKB-23 – Salyut]. Moscow: Vozdushnyy transport [Air transport], 2006, pp. 313–320.
- [14] Sapozhnikov V.B., Korol'kov A.V. *Otdelenie gaza ot zhidkosti v potoke gazozhidkostnoy smesi v usloviyakh nevesomosti s pomoshch'yu kombinirovannykh poristo-setchatykh materialov* [Separation of gas from a liquid in a gas-liquid mixture flow in zero gravity using combined porous-mesh materials] Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezul'taty, tekhnologii [Modern Science: Research, Ideas, Results, Technology], 2014, no. 1 (14), pp. 60–65.
- [15] Sapozhnikov V.B., Men'shikov V.A., Partola I.S., Korol'kov A.V. *Razvitie idey professora V.M. Polyayeva po primeneniyu poristo-setchatykh materialov dlya vnutribakovykh ustroystv, obespechivayushchikh mnogokratnyy zapusk zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [The development of ideas of Professor V.M. Polyayev on the use of porous-mesh materials for in-tank devices that provide multiple launch of liquid-propellant rocket engines]. Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Seriya «Mashinostroeniye» [Bulletin of the Moscow State Technical University named after N.E. Bauman. Series «Mashinostroeniye»], 2006, no. 2 (63), pp. 78–83.
- [16] Korol'kov A.V., Sapozhnikov V.B. *Nekotorye zadachi prikladnoy promyshlennoy matematiki v inzhenernom obespechenii kosmicheskikh poletov* [Some Problems of Applied Industrial Mathematics in the Engineering Support of Space Flight] Obozrenie prikladnoy i promyshlennoy matematiki [Review of Applied and Industrial Mathematics], 2016, v. 23, no. 4, pp. 363–366.
- [17] Sapozhnikov V.B., Grishko Ya.P., Korol'kov A.V., Bol'shakov V.A., Novikov Yu.M., Konstantinov S.B., Martynov M.B. *Primenenie kombinirovannykh poristo-setchatykh materialov v konstruktsii vnutribakovykh ustroystv dvigateley i razgonnykh blokov* [The use of combined porous-mesh materials in the design of internal equipment for propulsion systems of spacecraft, upper stages of launch vehicles and booster blocks] Materialy XIV Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy pamyati general'nogo konstruktora raketno-kosmicheskikh sistem akademika M.F. Reshetneva [Proceedings of the XIV International Scientific Conference dedicated to the memory of the general designer of space-rocket systems Academician M.F. Reshetneva], November 10–12, 2010, Krasnoyarsk. In 2 hours. Part 1. Krasnoyarsk: Siberian State Aerospace University, 2010, p. 126.
- [18] Sapozhnikov V.B., Grishko Ya.P., Korol'kov A.V., Bol'shakov V.A., Novikov Yu.M., Konstantinov S.B., Martynov M.B. *Primenenie kombinirovannykh poristo-setchatykh materialov v konstruktsii vnutribakovykh ustroystv dvigateley i razgonnykh blokov* [The use of combined porous-mesh materials in the design of internal storage devices of the propulsion systems of spacecraft, upper stages of launch vehicles and upper stages] Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. M.F. Reshetneva [Bulletin of the Siberian State Aerospace University M.F. Reshetneva], 2011, v. 3 (36), pp. 122–126.
- [19] Korol'kov A.V., Sapozhnikov V.B. *Raschetno-teoreticheskaya i eksperimental'naya otsenka rabotosposobnosti kombinirovannykh poristo-setchatykh materialov v kachestve kapillyarnykh zabornykh ustroystv toplivnykh bakov zhidkostnykh raketnykh dvigateley i ustanovok* [Theoretical and experimental evaluation of the performance of combined porous-mesh materials as capillary intakes for liquid-propellant rocket propulsion systems] Tezisy dokladov: 11-ya Mezhdunarodnaya konferentsiya «Aviatsiya i kosmonavtika–2012» [Abstracts: 11th International Conference «Aviation and Cosmonautics–2012»]. Moscow, MAI (NRU) November 13–15, 2012. Saint Petersburg: Masterskaya pechati [Workshop Press], 2012, 412 p, pp. 220–221.
- [20] Korol'kov A.V., Korol'kova L.V., Sapozhnikov V.B., Maslov V.A. *Otsenka ob'ema zhidkosti v telesnykh uglakh transportnykh zhelobov toplivnogo baka kosmicheskogo apparata* [Estimation of the volume of fluid in the solid corners of the transport chutes of the fuel tank of a spacecraft] Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2018, v. 22, no. 2, pp. 120–124. DOI: 10.18698 / 2542-1468-2018-2-120-124
- [21] Korol'kov A.V., Sapozhnikov V.B., Efremov N.V. *Dinamika zhidkosti v fazorazdelitel'nom ustroystve v period oporozhneniya toplivnogo baka kosmicheskogo apparata* [Fluid dynamics in a phase-separation device during the period of emptying the fuel tank of a spacecraft] Obozrenie prikladnoy i promyshlennoy matematiki [Review of Applied and Industrial Mathematics], 2018, t. 25, iss. 3, pp. 255–258.
- [22] Subbotin V.I., Kazanovskiy S.P., Korotaev S.K., Sviridenko V.E., Selivanov Yu.F. *Issledovanie dinamiki parovykh puzyr'kov pri kipenii vody na tonkikh provolokakh v usloviyakh estestvennoy konveksii* [Investigation of the dynamics of vapor bubbles in boiling water on thin wires under conditions of natural convection] Atomnaya energiya [Atomic Energy], 1970, no. 28, v. 1, pp. 9–13.
- [23] Savichev V.V., Korol'kov A.V., Vetoshkin A.M. *O gidrodinamike puzyr'kovogo kipeniya v nevesomosti* [On hydrodynamics of bubble boiling in zero gravity] Tr. Vtoraya Rossiyskaya natsional'naya konferentsiya po teploobmenu, v 8 t. T. 4. Kipenie, krizisy kipeniya, zakrizisnyy teploobmen. Isparenie, kondensatsiya [Second Russian National Heat Transfer Conference. In 8 v., v. 4. Boiling, boiling crises, supercritical heat exchange. Evaporation, condensation]. Moscow: MEI, 1998, pp. 206–209.

- [24] Korol'kov A.V., Korotaev S.K., Savichev V.V., Sviridenko I.P. *Issledovanie mekhanizma otrывa parovoy fazy pri poverkhnostnom kipenii zhidkosti* [Investigation of the vapor phase separation mechanism during surface boiling of a liquid] *Poverkhnost', rentgenovskie, sinkhrotronnye i neytronnye issledovaniya* [Surface, X-ray, synchrotron and neutron studies], 2001, no. 9, pp. 90–95.
- [25] Nesis E.I. *Kipenie zhidkostey* [Boiling liquids]. Moscow: Nauka [Science], 1973, 280 p.
- [26] Sapozhnikov V.B., Avraamov N.I. *Usloviya razrusheniya gazovykh polostey v zhidkosti pri perekhode ot nevesomosti k kratkovremennomu vozdeystviyu* [Conditions for the destruction of gas cavities in a liquid during the transition from weightlessness to short-term effects] *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering magazine: science and innovations], 2017, no. 2 (62), p. 1.
- [27] Sapozhnikov V.B., Korol'kov A.V. *Matematicheskoe modelirovanie protsessov kipeniya v nevesomosti* [Mathematical modeling of boiling processes in zero gravity] *Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezul'taty, tekhnologii* [Modern science: research, ideas, results, technologies], 2015, no. 1 (16), pp. 61–66.

Authors' information

Korol'kov Anatoliy Vladimirovich — Dr. Sci. (Phys.-Mat.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), korolkov@mgul.ac.ru

Efremov Nikolay Vladimirovich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), efremov@mgul.ac.ru

Sapozhnikov Vladimir Borisovich — Dr. Sci. (Tech.), General Director of LLC NTVTS «EDUCON», edukon@yandex.ru

Novikov Yuriy Mikhaylovich — BMSTU, Head of Department CJSC TSVTM at BMSTU, nolab@power.bmstu.ru

Bol'shakov Vladimir Andreevich — Engineer CJSC TSVTM at BMSTU, nolab@power.bmstu.ru

Aleksandrov Lev Grigor'evich — Head of the Sector of FSUE NPO S.A. Lavochkina, npol@laspace.ru

Konstantinov Sergey Borisovich — Cand. Sci. (Tech.), Leading Designer FSUE NPO them. S.A. Lavochkina, npol@laspace.ru

Partola Igor' Stanislavovich — Deputy Head of the Department of the State Research Center FSUE «Center of Keldysh», kerc@elnet.msk.ru

Received 19.04.2019.

Accepted for publication 15.07.2019.

ПРОБЛЕМА МИКРОДИНАМИЧЕСКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРЕЦИЗИОННЫХ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОСМИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ВЫСОКОМОДУЛЬНЫХ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

С.Н. Саяпин^{1,2}

¹ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 101000, г. Москва, Малый Харитоньевский пер., д. 4

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1

S.Sayapin@rambler.ru

Рассмотрены причины возникновения проблемы микродинамической чувствительности прецизионных крупногабаритных космических конструкций из высокомодульных волокнистых полимерных композиционных материалов, связанной со скачкообразным увеличением модуля упругости материала при преодолении пороговых значений малых напряжений. Представлены экспериментальные данные испытаний на сжатие трубчатых образцов-свидетелей с площадью поперечного сечения $4,52 \times 10^{-4} \text{ м}^2$, изготовленных из углепластика КМУ-4Л, на которых установлено скачкообразное увеличение модуля после прохождения пороговых значений малых напряжений. При этом средние значения модулей упругости на первом (от 0 до 5 кН) и последующих участках нагружения составили 7,375 ГПа и 158 ГПа соответственно. Показано, что при наземной отработке прецизионных крупногабаритных космических конструкций вследствие погрешности применяемых систем обезвешивания остаточные нагрузки на их элементы превышают значения указанных малых нагружений. В результате при малых нагружениях, возникающих в условиях орбитального полета, расчетные значения модуля упругости прецизионных крупногабаритных космических конструкций из высокомодульных волокнистых полимерных композиционных материалов могут оказаться выше реальных более чем в 20 раз и, соответственно, реальные упругие деформации конструкций могут быть существенно выше расчетных и превышать допустимые значения. Таким образом, при использовании высокомодульных волокнистых полимерных композиционных материалов в прецизионных крупногабаритных космических конструкциях, например, высокоточных параболических зеркалах из углепластика диаметром 10 м и более с точностью рабочей поверхности не уже 10 мкм, необходимо учитывать их микродинамическую чувствительность к внешним и внутренним микродинамическим воздействиям в условиях полета. Показаны возможные пути решения проблемы.

Ключевые слова: микродинамическая чувствительность, прецизионные КГКК из высокомодульных ВПКМ, системы обезвешивания

Ссылка для цитирования: Саяпин С.Н. Проблема микродинамической чувствительности прецизионных крупногабаритных космических конструкций из высокомодульных волокнистых полимерных композиционных материалов // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2019. Т. 23. № 4. С. 23–31.

DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-23-31

Применение высокомодульных волокнистых полимерных композиционных материалов (ВПКМ) в прецизионных крупногабаритных космических конструкциях (КГКК) обусловлено их высокой удельной жесткостью и низким значением температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР). В работе [1] представлены сравнительные характеристики высокомодульных ВПКМ, из которых следует, что наиболее предпочтительными для изготовления несущих и формообразующих элементов прецизионных КГКК являются углепластики. К прецизионным КГКК прежде всего следует отнести космические радио- и оптические телескопы диаметром 10 м и более. В силу своей протяженности и ограничений по размерам поперечных сечений они относятся к низкочастотным упругим конструкциям (0,1...5,0 Гц). При этом требования к их геометрической точности неуклонно возрастают. Так, например, в РФ ведутся работы по созданию космической обсерватории «Миллиметр»

с главным параболическим зеркалом (ГПЗ) диаметром 10 м из высокомодульного ВПКМ — углепластика (рис. 1) [2]. Геометрическая точность ГПЗ при всех условиях эксплуатации должна быть не хуже 10 мкм. В результате космическая обсерватория и другие прецизионные КГКК становятся микродинамически чувствительными системами к внешним и внутренним микродинамическим воздействиям (рис. 2) несмотря на их малые значения [2–4].

Здесь под микродинамической чувствительностью прецизионных КГКК следует понимать нарушение геометрической точности их формообразующих элементов от внешних и внутренних микродинамических воздействий в процессе эксплуатации. Очевидно, что для снижения микродинамической чувствительности прецизионных КГКК необходимо снижать значения внешних и внутренних микродинамических воздействий, с одной стороны, и разрабатывать оптимальные схемы армирования прецизионных формообразующих

элементов КГКК из ВПКМ, обеспечивающие максимальный модуль упругости при минимальном значении ТКЛР — с другой [2, 3]. В то же время даже при допустимых нагрузках может возникать микродинамическая чувствительность прецизионных КГКК к внешним и внутренним микродинамическим воздействиям, связанная непосредственно с самим высокомодульным ВПКМ после его полимеризации, которая слабо зависит от выбранной схемы армирования изделия, подавляется в наземных условиях силой тяжести и способна проявиться лишь в условиях невесомости. Такая микродинамическая чувствительность возникает в случаях, когда пороговые напряжения в ВПКМ от внешних и внутренних микродинамических воздействий еще недостаточны для полного включения в работу высокомодульных армирующих волокон, а величина деформирования длинномерных формообразующих прецизионных элементов, например, лепестков ГПЗ и опор контррефлектора космической обсерватории «Миллиметр» (см. рис. 1) выходит за пределы допустимых значений прецизионности КГКК [3, 4].

Ниже представлено описание проблемы микродинамической чувствительности и возможные пути ее решения.

Цель работы

Цель работы — выявление и описание проблемы микродинамической чувствительности прецизионных КГКК из высокомодульных ВПКМ и возможные пути ее решения.

Материалы и методы

Проблема микродинамической чувствительности прецизионных крупногабаритных космических конструкций из высокомодульных волокнистых полимерных композиционных материалов. В процессе проектирования прецизионных формообразующих элементов КГКК из высокомодульных ВПКМ выполняют предварительные расчеты, используя значения модуля упругости для выбранной схемы армирования, взятые из справочной литературы, которые впоследствии уточняют после проведения соответствующих испытаний на образцах-свидетелях.

Такой подход вполне корректен при изготовлении длинномерных элементов конструкций из ВПКМ с допустимыми значениями деформаций не более нескольких миллиметров. Например, в настоящее время успешно эксплуатируется космический радиотелескоп (КРТ) «Радиоастрон» (рис. 3), включающий в себя развернутое на орбите параболическое зеркало диаметром 10 м и фокальным расстоянием 4,22 м, составленное из центральной части диаметром 3 м и 27 консольных радиальных лепестков.

Центральная часть, лепестки и опора фокального блока изготовлены из углепластика. При этом максимальное отклонение рабочей поверхности параболического зеркала от теоретической поверхности не превышает 2 мм [3–7]. В процессе отработки процесса раскрытия лепестков, контроля геометрической точности рабочей поверхности параболического зеркала, а также юстировки антенны КРТ применялась система обезвешивания, снижающая деформацию ее формообразующих элементов до допустимых пределов (см. рис. 3). Высокие значения модулей упругости стержней опоры фокального блока и несущих элементов консольных лепестков из углепластика обеспечили им требуемую жесткость, несмотря на имеющую место погрешность системы обезвешивания.

В процессе создания КРТ «Радиоастрон» был изготовлен полномасштабный прототип варианта шестистержневой опоры фокального блока (рис. 4) [3, 4, 7, 8]. Каждый из стержней снабжен дифференциальным винтом и сферическим шарнирами на концах, которые позволяют обеспечивать точное регулирование его длины воспринимать нагрузку только на растяжение и сжатие. В результате шестистержневая опора фокального блока представляет собой пространственный механизм параллельной структуры с 6DoF подобный платформе Стюарта [9], обладающий геометрической неизменяемостью своей формы после фиксации дифференциальных винтов. Согласованное изменение длин стержней путем вращения их дифференциальных винтов позволило организовать юстировку облучателей, жестко связанных с фокальным блоком, относительной несущей конструкции космического аппарата с параболическим зеркалом.

Цельные длинномерные трубчатые стержни с внутренним диаметром 32 мм и схемой армирования $+80^0_1/0^0_{24}/-80^0_1$ изготовлены из углепластика КМУ-4Л путем поперечной намотки и продольной выкладки препрега ЛУП-0,2, пропитанного связующим ЭНФБ с использованием оригинальной оснастки [3, 8]. Испытания на сжатие проводились на образцах-свидетелях, отрезанных от концевых участков заготовок трубчатых стержней. При этом высота каждого образца-свидетеля из условия обеспечения устойчивости при сжатии составляла 60 мм при площади поперечного сечения $4,52 \times 10^{-4} \text{ м}^2$ [2–4, 7]. Испытания на сжатие проводились в диапазоне от 0 до $0,5 \times 10^2$ кН с шагом изменения нагрузки 5 кН. Среднее значение модуля упругости образцов-свидетелей на первом участке нагружения в диапазоне от 0 до 5 кН составило 7,375 ГПа, что соизмеримо со справочными данными для связующего ЭНФБ (3,6 ГПа) [10]. При дальнейшем нагружении образцов-свидетелей свыше 5 кН произошло скачкообразное

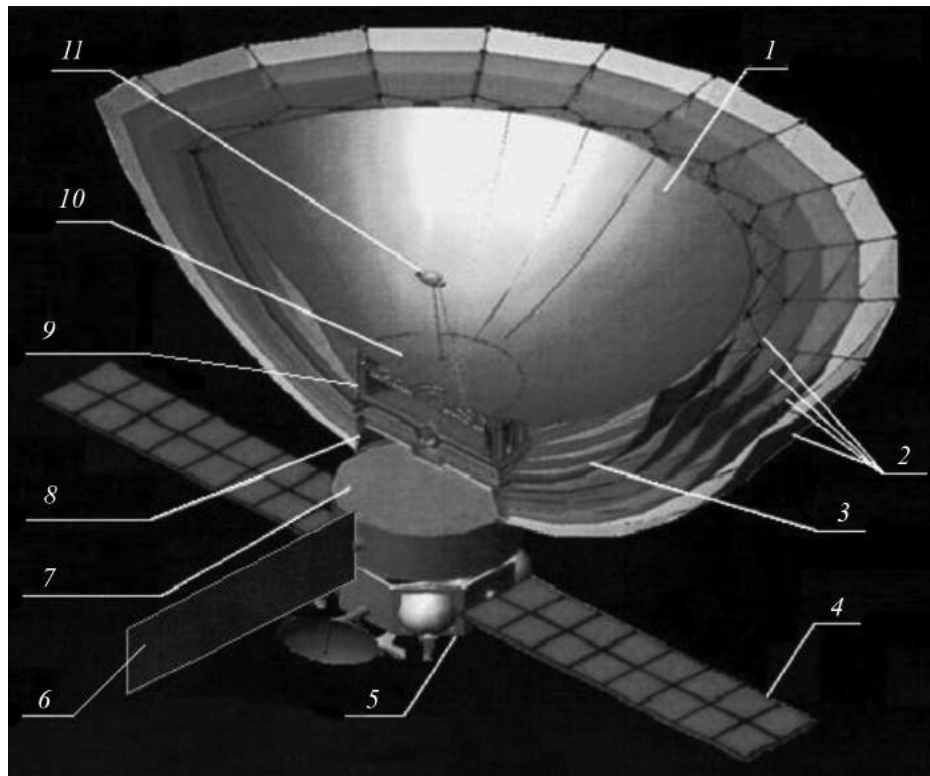


Рис. 1. Общий вид космической обсерватории «Миллиметрон»: 1 — лепестки рефлектора; 2 — система теплозащитных экранов; 3 — криоэкран; 4 — солнечные батареи; 5 — служебный модуль; 6 — радиатор; 7 — неохлаждаемый отсек; 8 — опора теплозащитных экранов; 9 — опорная ферма рефлектора с охлаждаемым контейнером; 10 — центральное зеркало; 11 — контррефлектор с опорами

Fig. 1. General view of the Millimetron space observatory: 1 — reflector lobes; 2 — a system of heat shields; 3 — cryoscreen; 4 — solar panels; 5 — service module; 6 — a radiator; 7 — uncooled compartment; 8 — support heat shields; 9 — supporting truss of a reflector with a cooled container; 10 — a central mirror; 11 — counterreflector with supports

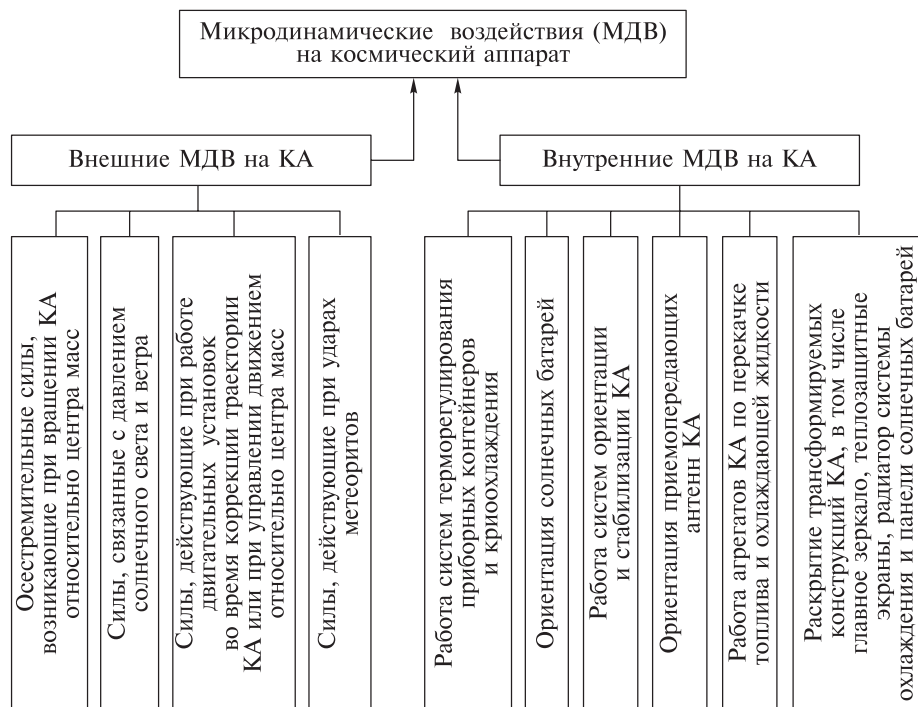


Рис. 2. Внешние и внутренние микродинамические воздействия на космический аппарат
Fig. 2. External and internal microdynamic effects on the spacecraft

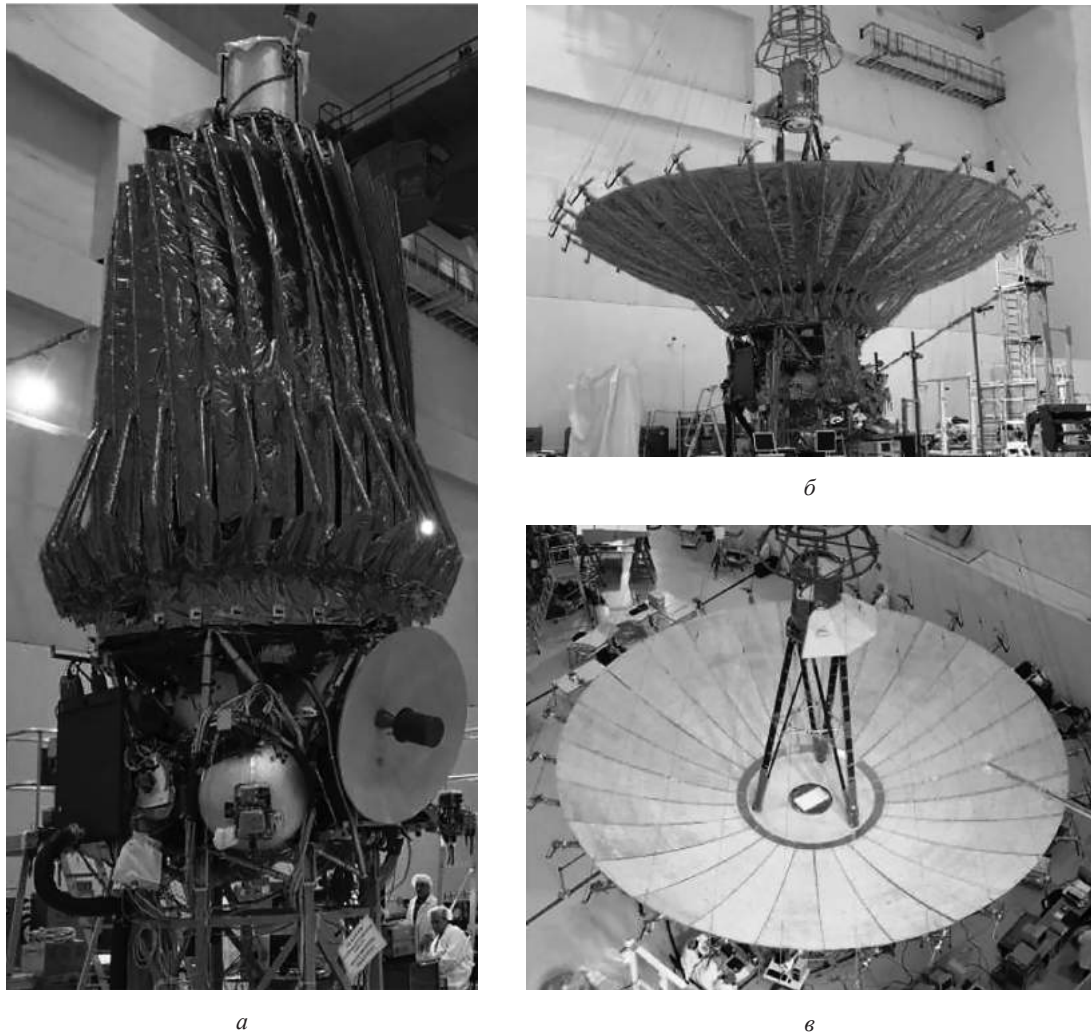


Рис. 3. Антенна космического радиотелескопа «Радиоастрон» в сложенном (а) и раскрытом (б, в) положениях
Fig. 3. The antenna of the Radioastron space radio telescope in the folded (a) and open (б, в) positions

увеличение модуля упругости до значения 158 ГПа, которое сохранялось вплоть до верхнего порога нагружения ($0,5 \times 10^2$ кН), что хорошо согласуется с регламентированным значением модуля упругости однонаправленного углепластика на основе препрега ЛУП-0,2, пропитанного связующим ЭНФБ (157 ± 25) ГПа [11]. На рис. 5 представлен график зависимости продольной деформации от нагрузки при сжатии образца-свидетеля, построенный по результатам испытаний. Таким образом, можно утверждать, что при малых напряжениях в образце-свидетеле в формировании модуля упругости углепластика участвует малое количество продольных углеродных волокон вследствие искривления продольных волокон в процессе формования изделий [1]. Предварительное натяжение продольных волокон приводит к тому, что после полимеризации они становятся частично растянутыми, а связующее — сжатым [12]. При нагружении образца-свидетеля свыше 5 кН в формировании модуля упругости принимают

участие все продольные волокна, и продольный модуль упругости скачкообразно увеличивается до расчетного значения [1, 10, 11].

В процессе наземной отработки КГКК для снижения влияния веса элементов конструкций на процесс их раскрытия и снижения величины деформаций их формообразующих элементов используют системы обезвешивания различных типов [13]. При этом, в зависимости от конфигурации и типа КГКК, погрешность системы обезвешивания может достигать 15 % [3, 13]. В результате напряжения от динамических и статических нагрузок, действующих на обезвешенные элементы КГКК из высокомодульных ВПКМ, существенно превосходят величины напряжений, соответствующих нагрузкам на участке малых напряжений от 0 до 5 кН (см. рис. 5). Вследствие этого неprecизионные КГКК не могут быть отнесены к механическим системам с микродинамической чувствительностью, поскольку деформации от внешних и внутренних микроди-

намических воздействий в космических условиях значительно ниже допустимых. Так, например, несмотря на применение систем обезвешивания при наземных испытаниях, конструкция антенны из углепластика КРТ «Радиоастрон» (см. рис. 3) не относится к прецизионным КГКК с микродинамической чувствительностью, так как допусковое отклонение геометрии ее крупногабаритных (длиной 3 м и более) формообразующих элементов от теоретической составляет ± 2 мм [5, 6]. В то же время прецизионные КГКК, точность которых в сотни раз выше, становятся микродинамически чувствительными системами и требуют особых подходов к их созданию. При наземной отработке прецизионных КГКК вследствие погрешности применяемых систем обезвешивания остаточные нагрузки на их элементы превышают значения указанных выше малых нагружений, что неизбежно приводит к искажению экспериментальных данных о деформациях при моделировании условий эксплуатации. В результате при малых нагружениях, возникающих в условиях орбитального полета от внешних и внутренних микродинамических воздействий, расчетные значения модуля упругости прецизионных КГКК могут оказаться меньше реальных более чем в 20 раз (см. рис. 5), и реальные упругие деформации конструкций могут быть существенно выше расчетных и допустимых.

В работе [14] отмечается, что на малых уровнях микрогравитации декремент затухания шар-баллонов орбитальной станции «Мир», установленных на концах консольных ферм из ВПКМ составлял 0,03, а на больших — 0,3. Об этом же для панелей солнечных батарей космического аппарата, указано в работе [15], что может свидетельствовать о наличии микродинамической чувствительности прецизионных протяженных элементов из высокомодульных ВПКМ при внешних и внутренних микродинамических воздействиях в условиях орбитального полета. Поэтому при расчетах следует учитывать значения модуля упругости, полученного при малых нагружениях образцов-свидетелей. Таким образом, при использовании высокомодульных ВПКМ в прецизионных КГКК важен учет их микродинамической чувствительности к внешним и внутренним микродинамическим воздействиям в условиях эксплуатации.

Результаты и обсуждение

Возможные пути решения проблемы микродинамической чувствительности прецизионных крупногабаритных космических конструкций из высокомодульных волокнистых полимерных композиционных материалов. Для решения указанной проблемы помимо усовершенствования технологии изготовления фор-

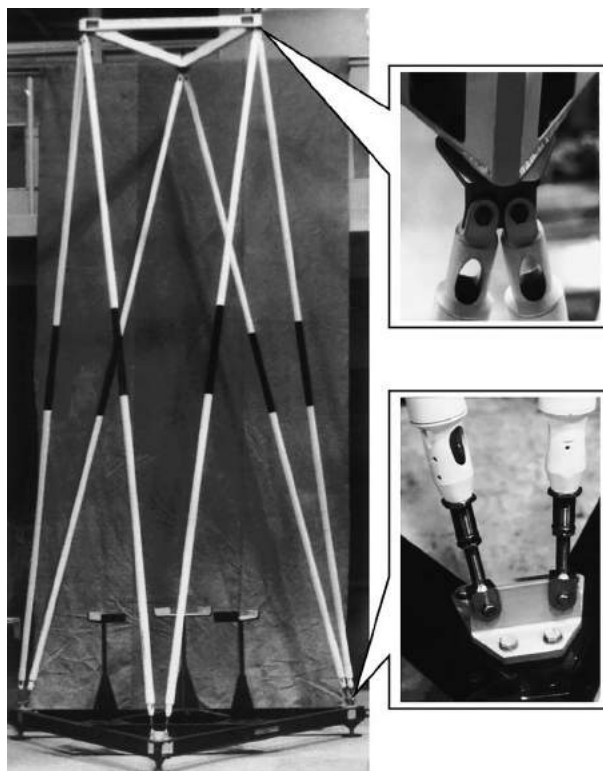


Рис. 4. Полномасштабный прототип шестистержневой опоры фокального блока из длинномерных углепластиковых стержней

Fig. 4. Full-scale prototype of the six-core focal block support made of long carbon fiber rods

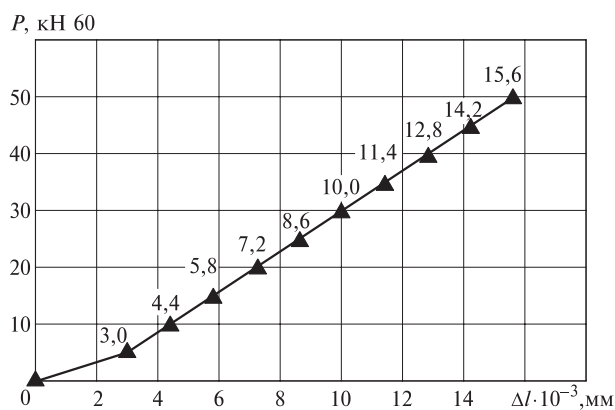


Рис. 5. Зависимость продольной деформации от нагрузки при сжатии образца-свидетеля из углепластика КМУ-4Л

Fig. 5. The dependence of the longitudinal strain on the load during compression of the witness specimen from carbon fiber KМУ-4L

мообразующих элементов из высокомодульных ВПКМ, необходимо организационно и конструктивно снижать величины внешних и внутренних микродинамических воздействий и эффективно применять системы активной, полупассивной и пассивной виброзащиты от них и адаптивного регулирования их геометрии в режиме реального времени [2–4, 16–18, 20, 21]. В длинномерных трубчатых элементах из высокомодульных

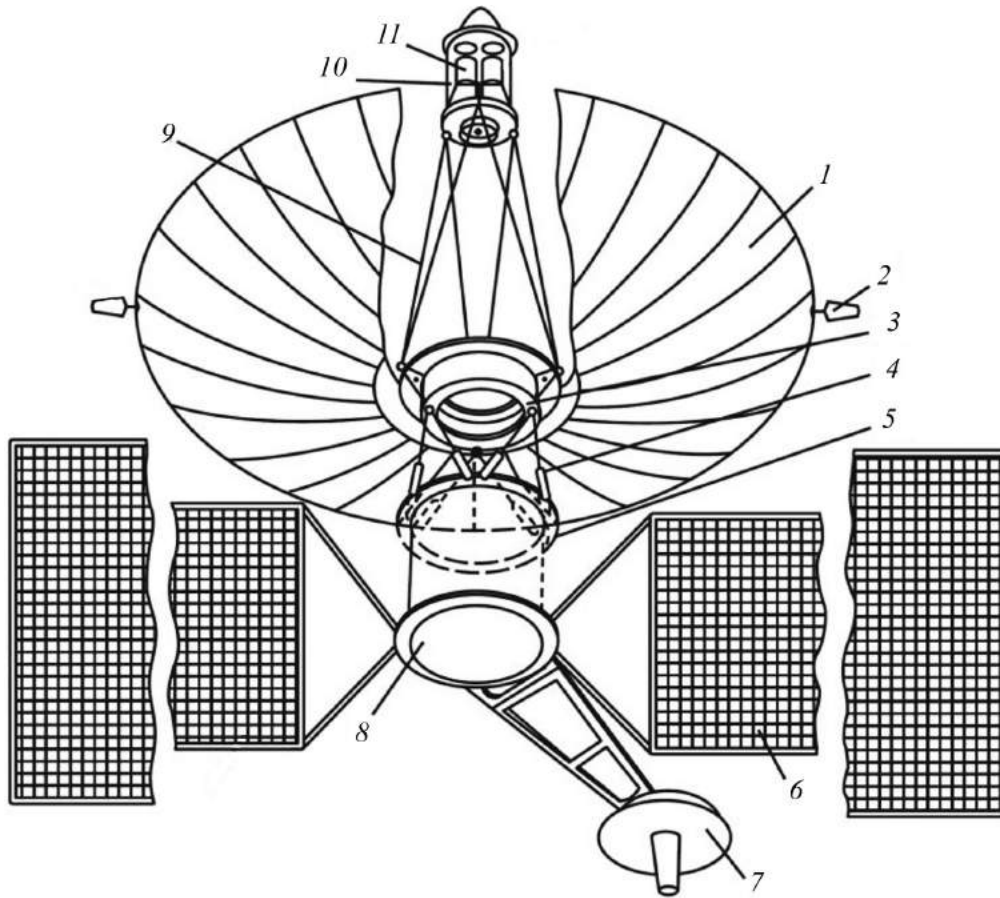


Рис. 6. Общий вид космического радиотелескопа с активной переходной фермой: 1 — прецизионный складной рефлектор антенны; 2 — малонаправленная антенна; 3 — платформа; 4 — активная переходная ферма; 5 — основание; 6 — панель солнечных батарей; 7 — телеметрическая антенна; 8 — несущая конструкция космического аппарата; 9 — опора фокального блока; 10 — фокальный блок; 11 — звездный датчик

Fig. 6. General view of a space radio telescope with an active transfer truss: 1 — precision folding antenna reflector; 2 — unidirectional antenna; 3 — platform; 4 — active transfer truss; 5 — base; 6 — solar panel; 7 — telemetric antenna; 8 — supporting structure of the spacecraft; 9 — focal block support; 10 — focal block; 11 — star sensor

ВПКМ, например, стержнях опоры фокального блока или вторичного зеркала (см. рис. 1, 3, 4), можно организовать предварительные напряжения за счет натяжения кабельного троса внутри опор, что позволит получить одинаковые значения модуля упругости во всем диапазоне нагрузок (см. рис. 5). Однако в этом случае из-за текучести материала длительная нагрузка способна привести к деформации и короблению элементов из высокомодульных ВПКМ, что потребует введения элементов автоматического регулирования их геометрии [3].

Все известные до второй половины 1990-х гг. виброзащитные системы прецизионных КГКК и их наведения в космическом пространстве представляли собой три последовательно соединенных уровня, расположенных между космическим аппаратом и КГКК: несущую, как правило, ферменную конструкцию; средства виброзащиты от внешних и внутренних микродинамических воз-

действий и прецизионное поворотное устройство углового наведения КГКК.

В ИМАШ РАН разработан одноуровневый принцип, основанный на выполнении несущей ферменной конструкции, системы активной виброзащиты и пространственного наведения КГКК в виде пространственного параллельного механизма с 6DoF [2–4, 16–18, 20–22] (рис. 6), подобного платформе Стюарта [9], которая при выключенных линейных приводах становится шестистержневой пространственной ферменной конструкцией.

Новый подход был успешно апробирован ИМАШ РАН на 2-й Европейской конференции по структурному управлению («Second European Conference on Structural Control», Champs-sur-Marne, France, July 3–6, 2000 [23]). Очевидно, что предлагаемый одноуровневый подход выгодно отличается от трехуровневого в связи с меньшими габаритами и массой, что делает его привлекательным

при создании подобных систем. Подобная одноуровневая система позволяет решить следующие проблемы: снизить микродинамическую чувствительность прецизионных КГКК из высокомодульных ВПКМ до допустимых значений и обеспечить их высокоточное наведение на исследуемый объект в космических условиях. При этом в ИМАШ РАН показана возможность одноуровневой системы обеспечивать активную виброзащиту и наведение прецизионных КГКК одновременно [19, 22].

Выводы

1. Выявлена проблема возникновения микродинамической чувствительности прецизионных КГКК из высокомодульных ВПКМ, связанная со скачкообразным увеличением модуля упругости материала при преодолении пороговых значений малых напряжений.

2. Экспериментально на трубчатых образцах-свидетелях с площадью поперечного сечения $4,52 \times 10^{-4} \text{ м}^2$, изготовленных из углепластика КМУ-4Л, установлено скачкообразное увеличение модуля упругости при сжатии образцов-свидетелей. При этом средние значения модулей упругости на первом (от 0 до 5 кН) и последующих участках нагружения составили 7,375 и 158 ГПа соответственно.

3. Установлено, что при малых нагружениях в условиях орбитального полета расчетные значения модуля упругости прецизионных КГКК из высокомодульных ВПКМ могут превышать реальные более чем в 20 раз и реальные упругие деформации подобных конструкций могут быть существенно выше расчетных и превышать допустимые значения.

4. Показано, что при наземной отработке прецизионных КГКК вследствие погрешности применяемых систем обезвешивания остаточные нагрузки на их элементы превышают значения указанных малых нагружений. Таким образом, при использовании высокомодульных ВПКМ в прецизионных КГКК, необходимо учитывать их микродинамическую чувствительность к внешним и внутренним микродинамическим воздействиям в орбитальном полете.

5. Представлены возможные пути решения проблемы микродинамической чувствительности для указанного типа космических конструкций.

Список литературы

- [1] Михайлин Ю.А. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике. СПб.: Научные основы и технологии, 2013. 720 с.
- [2] Саяпин С.Н., Артеменко Ю.Н., Мышонкова Н.В. Проблемы прецизионности криогенного космического телескопа обсерватории «МИЛЛИМЕТРОН» // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки, 2014. № 2 (53). С. 50–76.
- [3] Саяпин С.Н. Анализ и синтез раскрываемых на орбите прецизионных крупногабаритных механизмов и конструкций космических радиотелескопов лепесткового типа: Дис. ... д-ра техн. наук. М.: ИМАШ РАН, 2003. 446 с.
- [4] Саяпин С.Н. Проблема гравитационной чувствительности крупногабаритных прецизионных космических конструкций из высокомодульных ВПКМ // Труды III Межд. конф. «Деформирование и разрушение композиционных материалов и конструкций», Москва, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 23–25 октября 2018 г. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2018. С. 116–118.
- [5] Кардашев Н.С., Хартов В.В., Абрамов В.В. «Радиоастрон» — телескоп размером 300 000 км. Основные параметры и первые результаты наблюдений // Астрономический журнал, 2011. Т. 90. № 3. С. 179–222.
- [6] Андреев В.В., Кардашев Н.С., Хартов В.В. Наземно-космический радиоинтерферометр «Радиоастрон» // Космические исследования, 2014. Т. 52. № 5. С. 353–359.
- [7] Саяпин С.Н., Шкапов П.М., Кокушкин В.В. Применение эффекта Баушингера при длительном хранении полимерных композиционных конструкций в напряженном состоянии // Проблемы машиностроения и автоматизации, 2017. № 2. С. 63–72.
- [8] Саяпин С.Н., Евтов В.Д., Битушан Е.И. Способ изготовления полых изделий из композиционных материалов. Авторское св-во СССР №1666336. МКИ В29С 53/56, В29L 22/00. / Заявлено 27.07.88 г. Опубликовано 30.07.91 г., Бюл. № 28.
- [9] Stewart D. A platform with six degrees of freedom // Proc. Inst. Eng. 1965–66, v. 180, no. 15, pt. 1, pp. 371–386.
- [10] Гуняев Г.М., Сорина Т.Г., Хорошилова И.П., Румянцев А.Ф. Конструкционные эпоксидные углепластики // Авиационная промышленность, 1984. № 12. С. 1–16.
- [11] ГОСТ 28006–88. Лента углеродная конструкционная. Технические условия. Введ. 1990-01-01. М.: Государственный комитет СССР по стандартам: Изд-во стандартов, 1989. 14 с.
- [12] Языева С.Б., Андреев В.И., Блягоз А.М. Эффект «ям» коэффициента линейного температурного расширения армированных стеклопластиков // Новые технологии, 2012. № 3. С. 153–156.
- [13] Гайдукова А.О., Белянин Н.А. Обзор систем обезвешивания // Решетневские чтения, 2016. Т. 1. № 20. С. 93–95.
- [14] Рябуха С.Б., Киселев С.В. Исследование вибрационных возмущений на борту орбитального комплекса «Мир» // VII Российский симпозиум. Механика невесомости. Итоги и перспективы фундаментальных исследований гравитационно-чувствительных систем. Москва, ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН, 11–14 апреля 2000 г. М.: ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН, 2000. С. 102–104.
- [15] Моишеев А.А. Методология обеспечения прецизионности конструкции летательных аппаратов // Сб. тез. докл. XXV академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства, Москва, 24–26 января 2001 г. М.: Война и мир, 2001. С. 56–57.
- [16] Саяпин С.Н., Синев А.В., Трубников А.Г. Способ подавления помех от колебаний упругой конструкции космической трансформируемой антенны в процессе эксплуатации и устройство для его осуществления: Патент РФ №2161109, В64G1/00, 1/22, 3/00 / заявитель ФГБУН «ИМАШ РАН». Опул. 27.12.2000 г. Бюл. № 36.
- [17] Саяпин С.Н. Перспективы и возможное применение пространственных механизмов параллельной структуры в космической технике // Проблемы машиностроения и надежности машин, 2001. № 1. С. 17–26.

- [18] Саяпин С.Н., Кокушкин В.В. Способ подавления помех от колебаний упругой конструкции космической трансформируемой антенны в процессе эксплуатации и устройство для его осуществления: Патент РФ №2323136, В64G1/00, 1/22, 3/00 / заявитель ОАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева. Опубл. 27.04.2008 г. Бюл. № 12.
- [19] Preumont A. *Vibration Control of Active Structures: An Introduction*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, 432 p.
- [20] Sayapin S.N., Artemenko Yu.N. Intelligence System for Active Vibration Isolation and Pointing of Ultrahigh-Precision Large Space Structures in Real Time // *Smart Electromechanical Systems: The Central Nervous System*. Series «Studies in Systems, Decision and Control», 2016, v. 49, Chapter 10, Part II «Synthesis of Automatic Control Systems» / Ed. A.E. Gorodetskiy. Springer, Cham, Switzerland, 277 p., pp. 103–115.
- [21] Саяпин С.Н. Новые механизмы космической робототехники // *Новые механизмы в современной робототехнике* / под ред. В.А. Глазунова. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018. С. 207–231.
- [22] Bronowicki A.-J. Vibration Isolator for Large Space Telescopes // *J. of Spacecraft and Rockets*, 2006, v. 43, no. 1, pp. 45–53.
- [23] Sayapin S.N. Active vibration isolation and pointing system for high-precision large deployable space antennas (HLDSA) // *Abstracts of Second European Conference on Structural Control*. ENPC, Champs-sur-Marne, France, July 3–6, 2000, p. 231.

Сведения об авторе

Саяпин Сергей Николаевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Теоретическая механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана, гл. науч. сотр. ФГБУН «ИМАШ РАН», S.Sayapin@rambler.ru

Поступила в редакцию 19.04.2019.

Принята к публикации 15.07.2019.

MICRODYNAMICAL SENSITIVITY OF PRECISION LARGE-SIZE SPACE STRUCTURES FROM HIGH-MODULUS FIBROUS POLYMERCOMPOSITE MATERIALS

S.N. Sayapin^{1,2}

¹The Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of RAS, 4, Maly Khariton'evskiy per., 101000, Moscow, Russia

²BMSTU, 1, 2nd Baumanskaya st., 105005, Moscow, Russia

S.Sayapin@rambler.ru

The causes of microgravity problem and inertial sensitivity of precision large-size space structures from high-modulus fibrous polymer composite materials associated with an abrupt increase in the elastic modulus of the material when overcoming the threshold values of low stresses are considered. For example, the elastic modulus of tubular samples from high-modulus fibrous polymer composite materials with the longitudinal carbon fibers at the first (from 0 to 5 kN) and subsequent loading sites were 7,375 GPa and 158 GPa, respectively. As a result, under low loads arising in orbital flight, the calculated values of the elastic modulus of precision large-size space structures can be higher than the real ones by more than 20 times and the real elastic deformation in such structures can be higher than the calculated ones. Thus, when using high-modulus fibrous polymer composite materials in precision large-size space structures it is necessary to take into account their microgravity and inertial sensitivity in orbital flight. Possible ways of solving the problem are shown.

Keywords: microdynamics sensitivity, precision large-size space structures, high-modulus fibrous polymer composite materials, antygravity systems

Suggested citation: Sayapin S.N. *Problema mikrodinamicheskoy chuvstvitel'nosti pretsizionnykh krupnogabaritnykh kosmicheskikh konstruksiy iz vysokomodul'nykh voloknistykh polimernykh kompozitsionnykh materialov* [Microdynamical sensitivity of precision large-size space structures from high-modulus fibrous polymercomposite materials]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 4, pp. 23–31.

DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-23-31

References

- [1] Mikhaylin Yu.A. *Voloknistye polimernye kompozitsionnye materialy v tekhnike* [Fibrous polymeric composite materials in engineering]. St. Petersburg: Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2013, 720 p.
- [2] Sayapin S.N., Artemenko Yu.N., Myshonkova N.V. *Problemy pretsizionnosti kriogenogo kosmicheskogo teleskopa observatorii «MILLIMETRON»* [Problems of precision of the cryogenic space telescope of the OBSERVATORY «MILLIMETRON»]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Estestvennye nauki* [BMSTU Bulletin. Ser. of natural Sciences], 2014, no. 2 (53), pp. 50–76.
- [3] Sayapin S.N. *Analiz i sintez raskryvaemykh na orbite pretsizionnykh krupnogabaritnykh mekhanizmov i konstruksiy kosmicheskikh radioteleskopov lepestkovogo tipa* [Analysis and synthesis of precision large-size mechanisms and structures of petal-type space radio telescopes revealed in orbit]. *Diss. ... Dr. Sci (Tekh.)*. М.: IMASH RAN, 2003, 446 p.

- [4] Sayapin, S.N. *Problema gravitatsionnoy chuvstvitel'nosti krupnogabaritnykh pretsizionnykh kosmicheskikh konstruktсий i vysokomodul'nykh VPKM* [The problem of gravitational sensitivity of large-sized precision space structures made of high-modulus FPCM]. Trudy Tret'ey mezhduнародnoy konferentsii «Deformirovaniye i razrusheniye kompozitsionnykh materialov i konstruktсий» [Proceedings of the Third international conference «Deformation and destruction of composite materials and structures»]. Moscow — Izhevsk: Institut komp'yuternykh issledovaniy, 2018, pp. 116–118.
- [5] Kardashev N.S., Khartov V.V., Abramov V.V. i dr. «Radioastron» — teleskop razmerom 300000 km. Osnovnyye parametry i pervyye rezul'taty nablyudeniya [«Radioastron» — a telescope with a size of 300000 km. Main parameters and first observational results]. *Astronomicheskii zhurnal* [Astronomical journal], 2011, vol. 90, no. 3, pp. 179–222.
- [6] Andreyanov V.V., Kardashev N.S., Khartov V.V. *Nazemno-kosmicheskii radiointerferometr «Radioastron»* [Ground-space radio interferometer «Radioastron»]. *Kosmicheskie issledovaniya* [Space research], 2014, vol. 52, no. 5, pp. 353–359.
- [7] Sayapin S.N., Shkapov P.M., Kokushkin V.V. *Primeneniye effekta Baushingera pri dlitel'nom khraneniі polimernykh kompozitsionnykh konstruktсий v napryazhenном sostoyanii* [Application of the Baushinger' effect in long-term storage of polymer composite structures in a stressed state]. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii* [Problems of mechanical engineering and automation], 2017, no. 2, pp. 63–72.
- [8] Sayapin S.N., Evtov V.D., Bitushan E.I. i dr. *Sposob izgotovleniya polykh izdeliy iz kompozitsionnykh materialov* [Method of manufacturing hollow products from composite materials]. Copyright St. USSR in the number 1666336. MKI B29C 53/56, B29L 22/00, declared 27.07.88, published 30/07/91, bull. no. 28.
- [9] Stewart D. A platform with six degrees of freedom // *Proc. Inst. Eng.* 1965–1966, v. 180, no. 15, pt. 1, pp. 371–386.
- [10] Gunyaev G.M., Sorina T.G., Khoroshilova I.P., Rumyantsev A.F. *Konstruktсионnye epoksidnye ugleplastiki* [Structural epoxy carbon plastics]. *Aviatsionnaya promyshlennost'* [Aviation industry], 1984, no. 12, pp. 1–16.
- [11] *GOST 28006–1988. Lenta uglerodnaya konstruktсионnaya. Tekhnicheskie usloviya* [GOST 28006–1988. Carbon structural tape. Technical conditions. Enter 1990-01-01]. Moscow: Gosudarstvennyy komitet SSSR po standartam: Izd-vo standartov [State Committee of the USSR on standards: Standards Publishing House], 1989, 14 p.
- [12] Yazyeva S.B., Andreev V.I., Blyagoz A.M. *Effekt «yamy» koeffitsienta lineynogo temperaturnogo rasshireniya armirovannykh stekloplastikov* [The effect of «pit» coefficient of linear temperature expansion of reinforced fiberglass]. *Novye tekhnologii* [New technologies], 2012, no. 3, pp. 153–156.
- [13] Gaydukova A.O., Belyanin N.A. *Obzor sistem obezveshivaniya* [Review of antigravity systems]. *Reshetnevskie chteniya* [Resetdevice reading], 2016, v. 1, no. 20, pp. 93–95.
- [14] Ryabukha S.B., Kiselev S.V. *Issledovaniye vibratsionnykh vozmushcheniy na bortu orbital'nogo kompleksa «Mir»* [Investigation of vibration disturbances on Board the «Mir» orbital complex]. VII Rossiyskiy simpozium. *Mekhanika nevesomosti. Itogi i perspektivy fundamental'nykh issledovaniy gravitatsionno-chuvstvitel'nykh sistem* [Proceedings of the 7th Russian Symposium «Mechanics of weightlessness. Results and prospects of fundamental research of gravity-sensitive systems»], Moscow, IPMech RAS, April 11–14, 2000. Moscow: IPMech RAS, 2000, pp. 102–104.
- [15] Moisheev A.A. *Metodologiya obespecheniya pretsizionnosti konstruktсий letatel'nykh apparatov* [Methodology for ensuring the precision of aircraft design]. *Sbornik tezisov dokladov XXV akademicheskikh chteniy po kosmonavtike, posvyashchennykh pamyati akademika S.P. Koroleva i drugikh vydayushchikhsya otechestvennykh uchenykh — pionerov osvoeniya kosmicheskogo prostranstva* [Collection of abstracts of the XXV academic readings on cosmonautics devoted to the memory of academician S.P. Korolev and other outstanding Russian scientists — pioneers of space exploration]. Moscow, January 24–26, 2001. Moscow: Voina i mir, 2001, pp. 56–57.
- [16] Sayapin S.N., Sinev A.V., Trubnikov A.G. *Sposob podavleniya pomekh ot kolebaniy uprugoy konstruktсії kosmicheskoy transformiruemy anteny v protsesse ekspluatatsii i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [A method for suppressing interference from vibrations of the elastic structure of the space transformable antenna during operation and a device for its implementation]. Pat. Russian Federation, no. 2161109, B64G1/00, 1/22, 3/00, applicant «IMASH RAN» Publ. 27/12/2000, bull. no. 36.
- [17] Sayapin S.N. *Perspektivy i vozmozhnoye primeneniye prostranstvennykh mekhanizmov parallel'noy struktury v kosmicheskoy tekhnike* [Prospects and possible application of spatial mechanisms of parallel structure in space engineering]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Problems of mechanical engineering and reliability of machines], 2001, no. 1, pp. 17–26.
- [18] Sayapin S.N., Kokushkin V.V. *Sposob podavleniya pomekh ot kolebaniy uprugoy konstruktсії kosmicheskoy transformiruemy anteny v protsesse ekspluatatsii i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [A method for suppressing interference from vibrations of the elastic structure of the space transformable antenna during operation and a device for its implementation]. Pat. Russian Federation, no. 2323136, B64G1/00, 1/22, 3/00, applicant S.P. Korolev Rocket and Space Corporation «ENERGIA» Publ. 27/04/2008, bull. no. 12.
- [19] Preumont A. *Vibration Control of Active Structures: An Introduction*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, 432 p.
- [20] Sayapin S.N., Artemenko Yu.N. *Intelligence System for Active Vibration Isolation and Pointing of Ultrahigh-Precision Large Space Structures in Real Time // Smart Electromechanical Systems: The Central Nervous System. Series «Studies in Systems, Decision and Control»*, 2016, vol. 49, Chapter 10, Part II «Synthesis of Automatic Control Systems»/ Ed. A.E. Gorodetskiy. Springer, Cham, Switzerland, 277 p., pp. 103–115.
- [21] Sayapin S.N. *Novyye mekhanizmy kosmicheskoy robototekhniki* [New mechanisms of space robotics]. *Novyye mekhanizmy v sovremennoy robototekhnike* [New mechanisms in modern robotics]. Ed. V.A. Glazunov. Moscow: TECHNOSPHERA, 2018, pp. 207–231.
- [22] Bronowicki A.-J. *Vibration Isolator for Large Space Telescopes*. *J. of Spacecraft and Rockets*, 2006, vol. 43, no. 1, pp. 45–53.
- [23] Sayapin S.N. *Active vibration isolation and pointing system for high-precision large deployable space antennas (HLDSA)*. Abstracts of Second European Conference on Structural Control. ENPC, Champs-sur-Marne, France, July 3–6, 2000, p. 231.

Author's information

Sayapin Sergey Nikolaevich — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU, Chief Research Worker of Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of RAS, S.Sayapin@rambler.ru

Received 19.04.2019.

Accepted for publication 15.07.2019.

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОДДЕРЖКИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЭКИПАЖА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ ФОТОСЪЕМКЕ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

С.В. Бронников

ПАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева, 141070, Московская обл., г. Королев, ул. Ленина, д. 4а

post@rsce.ru

Проанализированы технология фотосъемок земной поверхности с борта космического аппарата и привязка полученных изображений к конкретной местности. Показано преимущество фотосъемок космонавтами с помощью автономных фотокамер, механически не связанных с корпусом космического аппарата. Предложены разработки интеграции с фотокамерой портативной угломерной системы. Рассмотрены различные варианты угломерных систем, созданных на различных основах: двух жестко связанных синхронизированных фотокамер; волоконно-оптического гироскопа компании «Оптолинк»; датчика угловых скоростей Mti фирмы Xsens Technologies; ультразвуковых датчиков. Обоснован выбор наилучшей угломерной системы. Изложено описание новых технологий, разработанных с использованием выбранной угломерной системы, в частности, технологий опознавания и последующей привязки фотоизображений, полученных с помощью автономных камер, включая определение углового положения оси объектива камеры, расчет текущего положения космического аппарата и расчет координат пересечения его оси с земной поверхностью, преобразование изображения в ортофотоплан и занесение его в базу данных. Кроме того, охарактеризованы технологии поддержки наведения камеры на внешний заданный объект, отображения текущего положения центра поля зрения камеры на дисплее, выдачи голосовых указаний по наведению. Сделан вывод о том, что применение указанных технологий позволяет повысить эффективность эксплуатации пилотируемых космических комплексов в целях изучения земной поверхности.

Ключевые слова: экипаж космического аппарата, привязка фотоизображений системе координат земной поверхности, поддержка наведения фотокамеры, угломерная система

Ссылка для цитирования: Бронников С.В. Новые технологии поддержки деятельности экипажа космического аппарата при фотосъемке земной поверхности // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2019. Т. 23. № 4. С. 32–38. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-32-38

Как указано в работе [1], фотоизображения земной поверхности, полученные экипажами пилотируемого космического аппарата (ПКА) через иллюминаторы с помощью высококачественной цифровой видео- и фотоаппаратуры профессионального уровня, широко используются различными организациями при выполнении научно-исследовательских и хозяйственных работ. Получаемые таким образом фотоизображения содержат важную оперативную информацию о состоянии природных или промышленных объектов, о катастрофических явлениях. Эту информацию можно использовать для решения различных задач, например, для оценки состояния лесов [2], прогнозирования землетрясений [3, 4], определения поглощаемого из атмосферы углерода древесной растительностью [5] и т. п. При этом должны быть известны географические координаты и геометрические характеристики изучаемых объектов, по которым выполняется так называемая «привязка» фотоизображения, т. е. происходит определение географических координат каждого пикселя изображения.

Цель работы

Целью работы является разработка устройства для автоматического определения углового положения оси объектива камеры, т. е. ее линии

визирования в момент съемки (устройство не должно образовывать механическую связь между камерой и корпусом космического аппарата), разработка технологии применения угломерной системы, которая обеспечивала бы минимизацию затрат времени экипажа и наземного персонала для привязки фотоизображений к участкам земной поверхности.

Материалы и методы

У космических фотоизображений земной поверхности, получаемых с автоматических космических аппаратов (КА), всегда известно пространственное положение линии визирования камеры, так как она жестко связана с их конструкцией. Привязка изображений к земной поверхности выполняется, исходя из положения КА на орбите и его пространственной ориентации в момент фотосъемки, по которым для каждого полученного кадра можно рассчитать географические координаты центра снимка. Далее опознается фотоизображение, путем его визуального сопоставления с ортофотопланом предполагаемого района фотосъемки, а затем рассчитываются координаты каждого пикселя изображения. Для фотосъемок с высоты 300–400 км над Землей ошибка определения центра изображения составляет около 10 км, поэтому опознавание является

относительно несложной задачей. После того как изображение опознано, т. е. снятый район найден на ортофотоплане, устанавливается соответствие не менее четырех характерных точек (объектов) на фотоизображении и на ортофотоплане [6]. Поскольку географические координаты любой точки ортофотоплана заранее известны, каждый снимок можно обработать и перевести в проекцию ортофотоплана, таким образом получая географические координаты всех пикселей фотоизображения.

Можно организовать фотосъемку на ПКА таким же способом как на автоматическом КА. Для того, чтобы получить данные о пространственном положении фотокамеры относительно ПКА установить механическую связь фотокамеры с корпусом ПКА с помощью двухступенного кронштейна, в состав которого включена угломерная система, которая измеряет угловое положение линии визирования фотокамеры относительно связанной системы координат ПКА. Однако, при этом проявляются следующие недостатки: ограничение свободы перемещения камеры, перекрытие иллюминатора кронштейном, передача вибраций от конструкции ПКА через кронштейн на фотокамеру, что затрудняет ее наведение. Кроме того, требуются затраты рабочего времени экипажа на монтажные операции фотокамеры на кронштейн, а также трудовые затраты наземного персонала на сбор и обработку информации о траектории КА и данных об угловом положении линии визирования фотокамеры.

С точки зрения эргономичности для космонавтов наиболее удобна фотосъемка с помощью автономных камер, не имеющих механической связи с корпусом станции. Такая съемка имеет следующие преимущества: оперативность, обзорность, гибкость и др. [1]. Невесомость создает для незакрепленной камеры условия идеального трехступенного подвеса, на который не передаются вибрации от конструкции ПКА и который позволяет космонавту с высокой точностью наводить камеру на объекты, отслеживать их прохождение, быстро переводить их на новую цель с учетом оперативно складывающейся обстановки, фиксировать неожиданно возникшие явления и новые объекты.

В случае фотосъемки, выполняемой космонавтами с использованием свободно перемещаемой камеры, положение оси объектива камеры относительно связанной системы координат КА в момент фотосъемки неизвестно. При наличии данных об угловом положении линии визирования фотокамеры в момент съемки предполагаемый район для опознавания фотоснимка составляет круг с радиусом около 30 км, а при отсутствии

этих данных — круг с радиусом около 400 км вокруг подспутниковой точки в момент съемки. При опознавании снимка в круге с радиусом 400 км существенно увеличиваются трудовые затраты на опознавание изображения. Особенно затруднено распознавание фотоизображений, полученных объективом с фокусным расстоянием 800 мм и более, так как они обычно включают в себя относительно небольшие районы земной поверхности. Некоторые однородные фотоизображения (лес, море) нет возможности опознать в связи с отсутствием каких-либо уникальных ориентиров.

В настоящее время российские космонавты, работающие на Международной космической станции (МКС), с помощью автономных камер ежегодно получают примерно 200 тыс. фотоснимков, для привязки которых требуются очень большие трудовые затраты, достигающие десятков тысяч человеко-часов в год.

Результаты и обсуждение

Перечислим основные требования к угломерной системе:

- минимизация ограничений для работы космонавтов при проведении фотосъемки;
- минимизация усложнения деятельности экипажа по проведению фотосъемки по сравнению с фотосъемками, в которых не требуется использование угломерной системы;
- достижение погрешности определения угла не более 1° .

В 2014 г. на МКС началось проведение космического эксперимента «Визир» (постановщик — ПАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева). В рамках эксперимента были разработаны и исследованы несколько угломерных систем, позволяющих определить угловое положение линии визирования фотокамеры относительно связанной системы координат ПКА при отсутствии механической связи фотокамеры с корпусом ПКА.

Вариант 1. Синхронное использование двух жестко связанных фотокамер, т. е. механическая сборка из двух камер.

Основная камера, с узкоугольным объективом, предназначена для фотосъемки Земли, вторая камера, с широкоугольным объективом, направлена на внутренний интерьер ПКА. По фотоизображениям элементов конструкции, интерьера или специальных маркеров возможно определение пространственного положения второй камеры относительно связанной системы координат ПКА. Затем, по данным о текущем положении ПКА в инерциальной системе координат, положении матриц ориентации ПКА и пространственного положения второй камеры относительно первой, можно определить положение основной камеры в инерциальной системе координат.

Вариант 2. Угломерная система на основе волоконно-оптического гироскопа компании «Оп-толинк» [7].

Задача заключалась в исследовании и демонстрации принципиальной возможности определения направления системы координат фотокамеры с помощью прибора ТИУС-500 (трехстепенной измеритель угловых скоростей). Прибор был прикреплен к объективу фотоаппарата. Данные с прибора ТИУС-500 и момент спуска затвора передавались по кабелю в бортовой компьютер экипажа, где проводился расчет ориентации фотоаппарата в момент срабатывания затвора [8, 12].

Вариант 3. Угломерная система на основе датчика угловых скоростей Mti фирмы Xsens Technologies.

Малогабаритный (55×58×22 мм) прибор MTi-28A53G25 фирмы Xsens Technologies B.V. (Нидерланды) [9] имеет жесткую механическую связь с фотокамерой и измеряет угловые скорости фотокамеры по значению силы Кориолиса от системы колеблющихся микробалок, связанных с пьезокристаллом. Прибор является, по сравнению с прибором ТИУС-500 менее чувствительным к резким поворотам и соударениям. Однако проверка его работы в условиях невесомости показала, что уход этого прибора, т.е. линейная составляющая систематической погрешности значений углов разворота относительно связанной системы координат ПКА, составляет до 0,6 град/с, а это для длительного процесса фотосъемки недопустимо. В земных условиях уход составлял всего 20 град/ч благодаря постоянной осуществляемой в приборе корректировке измерений путем использования направления гравитационного поля измеряемого с помощью встроенных акселерометров, что невозможно в условиях невесомости. Таким образом, измерение углового положения фотокамеры относительно связанной системы координат ПКА в невесомости с помощью приборов такого типа возможно лишь на очень коротких интервалах. Построение угломерной системы основанной на этих приборах было отклонено, тем не менее датчик нашел применение в качестве вспомогательной системы, сохраняющая данные о направлении при кратковременных потерях сигналов.

Вариант 4. Угломерная система положения фотокамеры относительно связанной системы координат ПКА на основе ультразвуковых датчиков.

Угломерная система, по техническому заданию РКК «Энергия», была разработана компанией «ruCar» [10] (г. Зеленоград), которая имела опыт построения ультразвуковых систем позиционирования, к достоинствам которых относятся следующие:

- портативность;
- низкий уровень электропотребления;

- высокая точность измерения углов линии визирования фотокамеры относительно связанной системы координат ПКА;

- простота расчета результатов;
- безопасность для человека.

К недостаткам ультразвуковых систем позиционирования можно отнести необходимость прямой видимости между излучателями и приемниками и снижение точности измерений при резких изменениях температуры и движении воздуха.

Принцип работы такой системы заключается в постоянном излучении ультразвуковых импульсов, получении их приемниками и измерении времени прохода импульсов от передатчиков до приемников. По времени прохода и скорости ультразвука рассчитываются все расстояния между излучателями, расположенными на камере, и приемниками, расположенными вокруг иллюминатора. По полученной совокупности всех расстояний в реальном времени вычисляются положение и ориентация камеры относительно системы координат ПКА, при этом для вычисления ориентации требуется не менее трех передатчиков.

Для синхронизации приемников и передатчиков, а также для передачи на компьютер момента спуска затвора используется радиопередатчик на платформе излучателей и радиоприемник в блоке управления [11, 12]. Внешний вид угломерной системы на Российском сегменте МКС приведен на рис. 1.

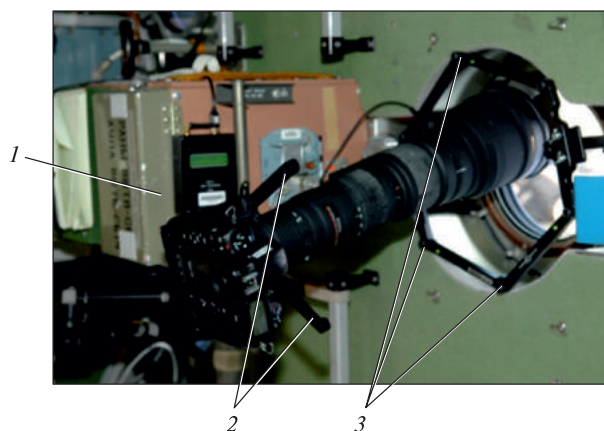


Рис. 1. Угломерная система на базе ультразвуковых датчиков: 1 — фотокамера; 2 — передатчики; 3 — приемники

Fig. 1. Goniometer system based on ultrasonic sensors: 1 — camera; 2 — transmitters; 3 — receivers

Несмотря на сложный алгоритм работы, угломерная система компактна и проста в эксплуатации, ее можно отнести к категории «подключи и работай», у нее нет органов управления и выключателей питания. Для использования аппаратуры необходимо только один раз выполнить монтаж ее модулей и соединить их входящими в комплект кабелями, установить сервисную программу

на компьютер, затем включить фотоаппарат и начать съемку. Работа аппаратуры происходит автоматически и незаметно для оператора, не мешает ему проводить фотографирование. При каждом срабатывании затвора фотоаппарата вычисляются абсолютные значения углов разворота оси объектива относительно системы координат ПКА, затем эти значения углов записываются в файл на бортовом компьютере вместе со временем производства снимка, что позволяет легко привязать снимок к географическим координатам на земной поверхности.

Угломерная система, созданная на базе ультразвуковых датчиков, обладает повышенными эргономическими качествами:

- дополнительные тренировки космонавта сведены к минимуму: требуется только короткое ознакомительное занятие;
- не изменена методика съемки: экипаж работает с камерой, оснащенной угломерной системой, так же как и без нее;
- не требуется технического обслуживания;
- имеются встроенные средства контроля работоспособности.

Погрешность определения направления составляет единицы градусов. Отклонение расчетных координат от истинных при тестировании в большинстве случаев не превышает 10 км.

Анализ экспериментальной отработки различных вариантов угломерных систем показал преимущество варианта 4 (таблица), который был принят для внедрения в эксплуатацию.

Результаты экспериментальной отработки различных вариантов угломерных систем

The results of experimental testing of various options of goniometric systems

Критерии	Варианты			
	1	2	3	4
Возможность автоматического расчета углового положения камеры в связанной системе координат КА	Нет	Есть	Нет	Есть
Соответствие точности определения углового положения камеры в связанной системе координат КА требованиям	Есть	Есть	Нет	Есть
Усложнение процедуры съемки (ограничения на перемещения, необходимость выполнения дополнительных действий)	Есть	Есть	Нет	Нет
Возможность наведения камеры по целеуказаниям	Нет	Есть	Есть	Есть
Необходимость использовать отдельный источник питания	Нет	Есть	Нет	Нет

Технология привязки фотоизображений с использованием разработанной угломерной системы

Новая технология привязки изображений с использованием разработанной угломерной системы приведена на рис. 2.

Новая технология привязки изображений с использованием угломерной системы отличается от технологии привязки изображений при отсутствии угломерной системы тем, что существенно упрощается работа наземного персонала. Отличительной особенностью новой технологии является то, что в момент срабатывания затвора фотокамеры, т. е. в момент формирования изображения, данные о текущем положении камеры и географические координаты центра изображения автоматически формируются и записываются в состав файла изображения. При этом текущее положение камеры получается путем расчета по данным прогноза орбитального движения КС или в готовом виде из бортовой системы навигации ПКА. Впоследствии при проведении привязки изображения на земле нет необходимости наземному персоналу проводить поиск соответствующих данных о движении ПКА, определять на ортофотоплане или на карте возможный район для привязки изображения, т.к. вся необходимая информация включена в файл изображения (фотоснимка). При этом площадь возможного района для привязки изображения уменьшается на два порядка. Это существенно повышает эффективность работы наземного персонала.

Технология поддержки наведения космонавтом фотокамеры на внешний заданный объект

Задача наведения длиннофокусной фотокамеры на заданный объект в большинстве случаев представляет собой непростую задачу. Скорость пролета МКС над земной поверхностью составляет 7 км/с. Время пролета над заданным объектом земной поверхности — 40...60 с. Во многих случаях, кроме съемок больших объектов или объектов, рядом с которыми имеются крупные ориентиры, заданный объект трудно идентифицировать, выделить из окружающего фона. Это может осложняться либо плохой освещенностью, либо наличием облачности.

Для поддержки наведения космонавту необходимо дать указание, куда отклонить линию визирования фотокамеры, чтобы центр поля зрения совместился с заданным внешним объектом.

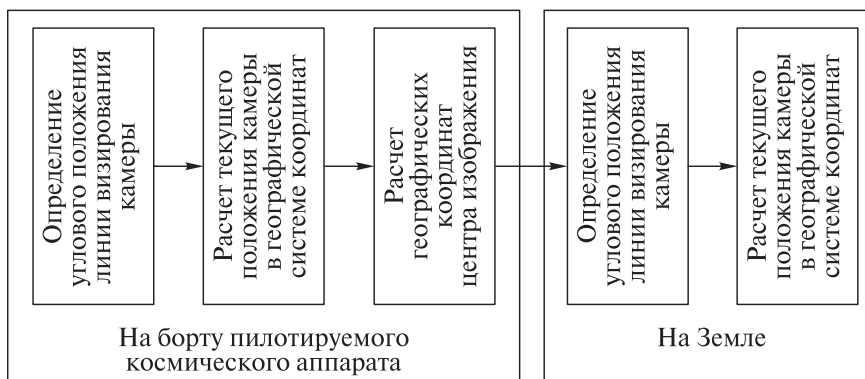


Рис. 2. Технология привязки изображений, полученных экипажем с помощью автономной фотокамеры с угломерной системой

Fig. 2. Linking image technology for received by the crew using a standalone camera with a goniometer system

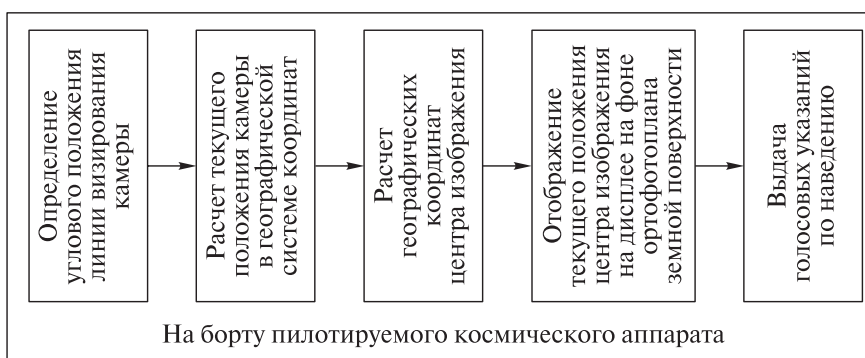


Рис. 3. Технология поддержки наведения камеры на заданный объект

Fig. 3. Camera pointing support technology at a given object

Разработанная технология поддержки наведения ручной фотокамеры на заданный объект заключается в том, что при приближении к цели угломерная система постоянно вычисляет направление линии визирования фотокамеры. На основании этих данных, а также местоположения станции на орбите и ее ориентации, получаемых от бортовых систем, вычисляются координаты пересечения линии визирования с земной поверхностью и отклонение этой точки от заданного объекта. Экипажу выдаются рекомендации для наведения камеры в голосовом виде и на экране дисплея [13]. Технологии поддержки наведения приведена на рис. 3.

Выводы

Представленные технологии позволяют повысить эффективность съемок заданных объектов. Космонавт может навести камеру и получить изображение если даже не успеет увидеть заданный объект.

Получаемые расчетные координаты снимков значительно облегчают процесс их опознавания, в большинстве случаев делая его тривиальным. Также возможно определение координат объектов, снятых в акватории Мирового океана или астрономических объектов на небесной сфере.

Список литературы

- [1] Васильев В.И., Сохин И.Г., Бронников С.В., Васильева Н.В., Гордиенко О.С. Визуально-инструментальные наблюдения с борта Международной космической станции экипажами российского сегмента и основные принципы подготовки к их выполнению // Пилотируемые полеты в космос, 2013 №2 (7). С. 23–29.
- [2] Давыдов В.Ф., Бронников С.В., Шалаев В.С., Щербаков А.С. Способ оценки состояния лесов. Патент на изобретение RUS2038001, 02.04.1992. URL: <https://findpatent.ru/patent/203/2038001.html> (дата обращения 19.02.2019).
- [3] Давыдов В.Ф., Никитин А.Н., Бронников С.В., Новоселов О.Н., Корольков А.В. Способ прогнозирования землетрясений. Патент на изобретение RUS 2262125, 08.06.2004. URL: <https://findpatent.ru/patent/226/2262125.html> (дата обращения 19.02.2019).
- [4] Давыдов В.Ф., Бронников С.В., Корольков А.В. Способ прогнозирования параметров землетрясения. Патент на изобретение RUS 2254599, 20.06.2005. URL: <https://findpatent.ru/patent/225/2254599.html> (дата обращения 19.02.2019).
- [5] Давыдов В.Ф., Никитин А.Н., Бронников С.В., Давыдова С.В. Способ определения стока поглощаемого из атмосферы углерода древесной растительностью. Патент на изобретение RUS 2342636, 27.12.2008. URL: <https://findpatent.ru/patent/234/2342636.html> (дата обращения 19.02.2019).
- [6] Бронников С.В., Караваев Д.Ю., Рожков А.С. Исследование технологии и средств привязки изображений

- Земли, полученных на пилотируемом космическом аппарате с помощью свободно перемещаемых камер // Космическая техника и технологии, 2016. № 2 (13). С. 105–115.
- [7] Компания Оптилинк. URL: <http://www.optolink.ru/ru/> (дата обращения 05.03.19).
- [8] Бронников С.В., Малименков Е.И., Рожков А.С., Караваев Д.Ю., Калери А.Ю., Крикалев С.К., Виноградов П.В. Способ определения географических координат изображений объектов на поверхности планеты при съемке с пилотируемого космического аппарата. Патент на изобретение RUS 2353902. 11.05.2007. URL: <https://findpatent.ru/patent/235/2353902.html> (дата обращения 19.02.2019).
- [9] Xsens Technologies. URL: <https://www.xsens.com/> (дата обращения 05.03.19).
- [10] Компания РУКЭП. URL: <http://rucap.ru/> (дата обращения 05.03.19).
- [11] Бронников С.В., Рожков А.С., Караваев Д.Ю., Рулев Д.Н., Руин О.С., Калифатиди А.К., Городецкий И.Г. Способ определения географических координат обла- сти наблюдения перемещаемой относительно космического аппарата аппаратуры наблюдения, система для его осуществления и устройство размещения излучателей на аппаратуре наблюдения. Патент на изобретение RUS 2524045. 27.02.2014. URL: <https://findpatent.ru/patent/252/2524045.html> (дата обращения 19.02.2019).
- [12] Бронников С.В., Городецкий И.Г., Калифатиди А.К., Караваев Д.Ю., Рожков А.С., Руин О.С. Привязка изображений земной поверхности, полученных с помощью ручных камер на пилотируемых КА // Тр. XLVII науч. чтений, посвященных разработке и развитию идей К.Э. Циолковского, Калуга, Государственный музей истории космонавтики им. К.Э. Циолковского, 18–20 сентября 2012. Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2012. С. 24–32.
- [13] Бронников С.В., Рожков А.С., Караваев Д.Ю. Способ ориентирования перемещаемого в пилотируемом аппарате прибора и система для его осуществления. Патент на изобретение RUS 2531781. 27.02.2014. URL: <https://findpatent.ru/patent/253/2531781.html> (дата обращения 19.02.2019).

Сведения об авторе

Бронников Сергей Васильевич — канд. техн. наук, начальник отделения ПАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева, post@rsce.ru

Поступила в редакцию 19.04.2019.

Принята к публикации 15.07.2019.

NEW TECHNOLOGIES TO SUPPORT SPACE VEHICLE CREW IN PHOTOGRAPHING EARTH SURFACE

S.V. Bronnikov

RSC «Energia» by S.P. Korolev, 4a, Lenina st., 141070, Korolev, Moscow reg., Russia

post@rsce.ru

The technology of photographing the earth surface from the spacecraft and the binding of the obtained images to a specific area are analyzed. The advantage of photographing by astronauts using onboard cameras not mechanically connected to the spacecraft body is shown. The development of a portable goniometer integration system with a camera is proposed. Various options of goniometric systems created on various bases are considered, two rigidly connected synchronized cameras; Optolink Fiber Optic Gyro; Mti angular velocity sensor from Xsens Technologies; ultrasonic sensors. The choice of the best goniometer system is justified. A description is given of new technologies developed using the selected goniometric system, in particular, technologies for identifying and subsequently referencing photographs obtained using autonomous cameras, including determining the angular position of the axis of the camera lens, calculating the current position of the spacecraft, and calculating the coordinates of the intersection of its axis with the earth's surface, converting the image into an orthophotomap and entering it into the database. In addition, support for pointing the camera at an external target object, displaying the current position of the center of the field of view of the camera on the display, and issuing voice guidance on hovering have been characterized. It is concluded that the use of these technologies can improve the efficiency of operation of manned space systems in order to study the earth surface.

Keywords: spacecraft crew, image binding process, photo camera pointing support, goniometer system

Suggested citation: Bronnikov S.V. *Novye tekhnologii podderzhki deyatel'nosti ekipazha kosmicheskogo apparata pri fotos'emke zemnoy poverkhnosti* [New technologies to support space vehicle crew in photographing Earth surface]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 4, pp. 32–38. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-32-38

References

- [1] Vasil'ev V.I., Sokhin I.G., Bronnikov S.V., Vasil'eva N.V., Gordienko O.S. *Vizual'no-instrumental'nye nablyudeniya s borta mezhdunarodnoy kosmicheskoy stantsii ekipazhami rossiyskogo segmenta i osnovnye printsipy podgotovki k ikh vypolneniyu* [Visual and instrumental observations from the board of the international space station by the crews of the Russian segment and the basic principles of preparation for their implementation]. *Pilotiruemye polety v kosmos* [Piloted Space Flight], 2013, no. 2 (7), pp. 23–29.

- [2] Davydov V.F., Bronnikov S.V., Shalaev V.S., Shcherbakov A.S. *Sposob otsenki sostoyaniya lesov* [The method of assessing the state of forests]. Patent RUS2038001, 04.02.1992. URL: <https://findpatent.ru/patent/203/2038001.html> (accessed 19.02.2019).
- [3] Davydov V.F., Nikitin A.N., Bronnikov S.V., Novoselov O.N., Korol'kov A.V. *Sposob prognozirovaniya zemletryaseniy* [A method for predicting earthquakes]. Patent RUS 2262125, 08.06.2004. URL: <https://findpatent.ru/patent/226/2262125.html> (accessed 19.02.2019).
- [4] Davydov V.F., Bronnikov S.V., Korol'kov A.V. *Sposob prognozirovaniya parametrov zemletryaseniya* [A method for predicting earthquake parameters]. Patent RUS 2254599, 20.06.2005. URL: <https://findpatent.ru/patent/225/2254599.html> (accessed 19.02.2019).
- [5] Davydov V.F., Nikitin A.N., Bronnikov S.V., Davydova S.V. *Sposob opredeleniya stoka pogloshchaemogo iz atmosfery ugleroda drevesnoy rastitel'nost'yu* [The method for determining the flow of carbon absorbed from the atmosphere by tree vegetation]. Patent RUS 2342636, 12.27.2008. URL: <https://findpatent.ru/patent/234/2342636.html> (accessed 19.02.2019).
- [6] Bronnikov S.V., Karavaev D.Yu., Rozhkov A.S. *Issledovanie tekhnologii i sredstv privyazki izobrazheniy zemli, poluchennykh na pilotiruемом kosmicheskom apparate s pomoshch'yu svobodno peremeshchaemykh kamer* [Study of technology and means of binding images of the earth obtained on a manned spacecraft using freely movable cameras] *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii* [Space equipment and technology], 2016, no. 2 (13), pp. 105–115.
- [7] *Kompaniya Optolink* [Optolink company]. URL: <http://www.optolink.ru/ru/> (accessed 05.03.19).
- [8] Bronnikov S.V., Malimenkov E.I., Rozhkov A.S., Karavaev D.Yu., Kaleri A.Yu., Krikalev S.K., Vinogradov P.V. *Sposob opredeleniya geograficheskikh koordinat izobrazheniy ob'ektov na poverkhnosti planety pri s'emke s pilotiruемого kosmicheskogo apparata* [The method of determining the geographical coordinates of images of objects on the surface of the planet when shooting from a manned spacecraft]. Patent RUS 2353902, 11.05.2007. URL: <https://findpatent.ru/patent/235/2353902.html> (accessed 19.02.2019).
- [9] Xsens Technologies. URL: <https://www.xsens.com/> (accessed 05.03.19).
- [10] Company RUCAP. URL: <http://rucap.ru/> (accessed 05.03.19).
- [11] Bronnikov S.V., Rozhkov A.S., Karavaev D.Yu., Rulev D.N., Rurin O.S., Kalifatidi A.K., Gorodetskiy I.G. *Sposob opredeleniya geograficheskikh koordinat oblasti nablyudeniya peremeshchaemoy otnositel'no kosmicheskogo apparata apparatury nablyudeniya, sistema dlya ego osushchestvleniya i ustroystvo razmeshcheniya izluchateley na apparature nablyudeniya* [The method of determining the geographic coordinates of the observation area of the surveillance equipment being moved relative to the spacecraft, the system for its implementation and the arrangement of the emitters on the observation equipment]. Patent RUS 2524045, 02.27.2014. URL: <https://findpatent.ru/patent/252/2524045.html> (accessed 19.02.2019).
- [12] Bronnikov S.V., Gorodetskiy I.G., Kalifatidi A.K., Karavaev D.Yu., Rozhkov A.S., Rurin O.S. *Privyazka izobrazheniy zemnoy poverkhnosti, poluchennykh s pomoshch'yu ruchnykh kamer na pilotiruemykh K* [Binding of images of the earth's surface, obtained using hand-held cameras on manned spacecraft] *Trudy XLVII nauchnykh chteniy, posvyashchennykh razrabotke i razvitiyu idey K.E. Tsiolkovskogo* [Proceedings XLVII scientific readings on the development and development of the ideas of K.E. Tsiolkovsky], Kaluga, State Museum of the History of Cosmonautics. K.E. Tsiolkovsky, September 18–20, 2012. Kazan: Kazan (Volga Region) Federal University, 2012. p. 24–32.
- [13] Bronnikov S.V., Rozhkov A.S., Karavaev D.Yu. *Sposob orientirovaniya peremeshchaemogo v pilotiruемом apparate pribora i sistema dlya ego osushchestvleniya* [The method of orientation of the device being moved in a manned device and the system for its implementation] Patent RUS 2531781, 02.27.2014. URL: <https://findpatent.ru/patent/253/2531781.html> (accessed 19.02.2019).

Author's information

Bronnikov Sergey Vasil'evich — Cand. Sci. (Tech.), Head of department, of Rocket and Space Corporation «Energia» by S.P.Korolev, post@rsce.ru

Received 19.04.2019.

Accepted for publication 15.07.2019.

ГИБРИДНЫЙ НАКОПИТЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ И БЛОКОВ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ ДЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ВОЗВРАЩАЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Г.В. Носкин, Е.С. Хаванов, Р.А. Бесчастный

ПАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева, 141070, Московская обл., г. Королев, ул. Ленина, д. 4а

post@rsce.ru

Разработана структурная схема гибридного накопителя электрической энергии на основе литий-ионной аккумуляторной батареи и блока суперконденсаторов как дополнительного накопителя электрической энергии для обеспечения запитки пирсредств возвращаемого космического аппарата при спуске и посадке, сопровождающейся выдачей большой кратковременной мощности. В MATLAB/Simulink синтезирована имитационная математическая модель и проведена серия успешных тестов, для уточнения электрических параметров аккумуляторной батареи и суперконденсаторов с учетом максимальных требований по нагрузкам возвращаемых космических аппаратов. По результатам проведенных тестов уточнены электрические параметры аккумуляторной батареи и суперконденсаторов в составе гибридного накопителя. Рассчитаны удельная энергоемкость и удельная мощность гибридного накопителя применительно к системам электроснабжения перспективных возвращаемых космических аппаратов.

Ключевые слова: гибридный накопитель электрической энергии, возвращаемый космический аппарат, накопитель электрической энергии, литий-ионный аккумулятор, суперконденсатор, имитационная математическая модель

Ссылка для цитирования: Носкин Г.В., Хаванов Е.С., Бесчастный Р.А. Гибридный накопитель электрической энергии на основе литий-ионных аккумуляторов и блоков суперконденсаторов для систем электроснабжения возвращаемых космических аппаратов // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2019. Т. 23. № 4. С. 39–48. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-39-48

Целевые задачи современных и перспективных возвращаемых космических аппаратов (ВКА) постоянно усложняются, вызывая усложнение требований, предъявляемых ко всем узлам ВКА [1].

Одним из важнейших узлов ВКА является система электроснабжения (СЭС), состоящая из накопителей электрической энергии (НЭЭ), соединительных кабелей и различной аппаратуры управления [2, 3].

Система электроснабжения ВКА предназначена для хранения электрической энергии и эффективного обеспечения ею нагрузок ВКА с сохранением при заданном ресурсе высоких показателей надежности, живучести и безопасности [3].

Проектирование НЭЭ как основы системы электроснабжения ВКА в зависимости от сложности задач, должно опираться на следующие критерии [2, 3]:

- удельную энергоемкость, Вт·ч/кг;
- максимальную развиваемую мощность, Вт;
- удельную мощность, Вт/кг;
- безопасность, надежность и живучесть;
- температурный диапазон работы;
- многоразовость и унифицируемость применения [3].

До настоящего времени выполнить требования, в совокупности удовлетворяющие всем упомянутым критериям, не представлялось возможным, в связи с чем, было допущено их

ослабление, в частности, по менее значимым критериям: многоразовости и унифицируемости применения [1, 3, 4].

В настоящее время разработаны аккумуляторные батареи с высокими показателями удельной энергоемкости, поэтому задача проектирования унифицируемого многоразового НЭЭ, удовлетворяющего вышеупомянутым критериям для СЭС отечественных ВКА, подкрепляемая возможностью удешевления космических миссий и упрощения операций межполетного обслуживания, уже не является трудновыполнимой, однако при унификации проектируемый НЭЭ должен удовлетворять требованиям по нагрузкам как современных ВКА — КА «Союз» и ТГК «Прогресс», так и перспективных ВКА.

Перспективные ВКА обладают схожей с современными ВКА циклограммой работы, но имеют некоторое преимущество по нагрузкам, поэтому при проектировании унифицированного гибридного НЭЭ необходимо учесть, прежде всего, особенности перспективных ВКА.

Одной из особенностей перспективных ВКА, заслуживающей особого внимания, является необходимость обеспечения средствами СЭС импульсных нагрузок большой мощности на фоне непрерывного электропитания стационарной нагрузки перспективных ВКА. Такой режим вызван необходимостью подрыва большого количества

пиросредств спуска и посадки перспективных ВКА и является критическим для любого НЭЭ. Это требует неотложного решения.

Цель работы

Целью настоящей работы является разработка схемы гибридного НЭЭ на основе литий-ионной батареи с феррофосфатным катодом и блоком суперконденсаторов для повышения общей удельной мощности накопителя [12], а на базе этой схемы — имитационной математической модели для проверки способности гибридного НЭЭ выполнить требования по нагрузкам как перспективных, так и современных ВКА на этапе спуска. Предполагается, что разработанный гибридный НЭЭ будет применяться как унифицированный на известных отечественных ВКА [1].

Материалы и методы

Оценка энергетических характеристик аккумулятора и блока суперконденсаторов. Важнейшей характеристикой аккумуляторной батареи является эффективная энергия, которая представляет собой такое количество энергии, которое она гарантированно выдаст на постоянную внешнюю нагрузку $R_{п.н}$ в интервале допустимых напряжений $\Delta U_{а.б} = U_{\max а.б} - U_{\min а.б}$.

Интервал допустимых напряжений определяется согласно особенностям работы бортовой аппаратуры ВКА.

Внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи мало по сравнению с сопротивлениями внешних нагрузок ВКА, поэтому в данных расчетах было решено им пренебречь. Тогда при разряде на постоянную внешнюю нагрузку $R_{п.н}$ ($R_{п.н} \sim \text{constant}$) в течение времени τ с минимальным допустимым напряжением $U_{\min а.б}$ минимальная энергия может определяться выражением

$$W_{\min а.б} = \frac{\tau \cdot U_{\min а.б}^2}{R_{п.н}}. \quad (1)$$

При разряде на постоянную нагрузку $R_{п.н}$ в течение времени τ с максимальным допустимым напряжением $U_{\max а.б}$, максимальная энергия определяется как

$$W_{\max а.б} = \frac{\tau \cdot U_{\max а.б}^2}{R_{п.н}}. \quad (2)$$

Исходя из формул (1) и (2), выражение для нахождения средней эффективной энергии для обеспечения питания постоянной нагрузки ВКА в интервале допустимых напряжений $\Delta U_{а.б} = U_{\max а.б} - U_{\min а.б}$ будет иметь вид

$$W_{\text{ср.эф.а.б}} = \frac{\tau(U_{\max а.б}^2 - U_{\min а.б}^2)}{2R_{п.н}}. \quad (3)$$

Характеристикой, по которой можно оценить суперконденсатор, является его емкость [5]. При централизованном расположении блока суперконденсаторов (непосредственно в гибридном НЭЭ), его энергия на время импульса будет обеспечивать весь спектр нагрузок ВКА:

$$R_{\text{имп.н}} + R_{п.н}$$

Пусть интервал допустимых напряжений ряда блока суперконденсаторов

$$\Delta U_{б.с.к} = U_{\max б.с.к} - U_{\min б.с.к}$$

Если не использовать дополнительные устройства стабилизации выходного напряжения блока суперконденсаторов, необходимо увеличивать интервал допустимых напряжений по верхнему пределу, поэтому его целесообразно проектировать с $U_{\max б.с.к} > U_{\max а.б}$, и чем больше будет левая часть данного неравенства, тем больше времени будет обеспечиваться питанием нагрузка перспективного ВКА средствами блока суперконденсаторов [4].

Пусть в части обеспечения питания импульсной нагрузки ВКА необходимо обеспечить n последовательных импульсов, длительностью τ с промежутком между импульсами T . Положим, что $T \Rightarrow 0$, тогда в пределе $T \Rightarrow 0$ среднюю эффективную энергию блока суперконденсаторов можно быть представить выражением

$$W_{\text{сред.эф.б.с.к}} = \frac{\tau n (U_{\max б.с.к}^2 - U_{\min б.с.к}^2)}{2(R_{\text{имп.н}} + R_{п.н})}, \quad (4)$$

где условие $T \Rightarrow 0$ позволяет максимально жестко задать требования к блоку суперконденсаторов и, что упрощает задачу, не рассматривать наблюдаемые на практике релаксирующие процессы в блоке суперконденсаторов между импульсами, объединить n импульсов в один импульс с длительностью τn [8].

В зависимости от требований в части нагрузок того или иного ВКА, блок суперконденсаторов следует собирать из разного количества отдельных ячеек. При расчете энергии блока, состоящего из k последовательно соединенных ячеек суперконденсаторов, учитывается, что

$$C_{б.с.к} = C_i / k, \quad U_{\text{общ. б.с.к}} = k U_{с.к}$$

где C_i и $U_{с.к}$ — емкость и рабочее напряжение каждой отдельной ячейки суперконденсатора [15, 16].

С учетом максимального разрядного тока каждого суперконденсатора количество параллельных ветвей последовательных суперконденсаторов определится по формуле

$$P = \frac{I_{\max б.с.к}}{I_{\max C_i}}, \quad (5)$$

где P — количество параллельных ветвей (округляется вверх) из k последовательных суперконденсаторов; $I_{\max б.с.к}$ — требуемый максимальный

ток блока суперконденсаторов; $I_{\max C_i}$ — максимальный ток единичного суперконденсатора.

Эффективную емкость блока суперконденсаторов с учетом выражения (4) можно представить в виде

$$W_{\text{ср.эф.б.с.к}} = \frac{W_{\text{ср.эф.б.с.к}}}{U_{\text{макс б.с.к}}^2 - U_{\text{мин б.с.к}}^2} = \frac{\tau n}{2(R_{\text{имп.н}} + R_{\text{п.н}})}. \quad (6)$$

Поскольку кабельная сеть системы электропитания ВКА имеет ненулевые индуктивность и емкость, в ней не будет скачков напряжения при переходных процессах, обусловленных коммутациями узлов, поэтому было решено пренебречь завалами по фронтам импульса длительностью τn в вышеуказанных теоретических выкладках [4, 8, 13, 14]. Также не учитывались температурные эффекты аккумуляторных батарей и блока суперконденсаторов.

Проект гибридного накопителя электрической энергии унифицированного для системы электроснабжения возвращаемого космического аппарата. При проектировании гибридного НЭЭ, унифицированного для СЭС современных и перспективных ВКА, ставилась задача сочетания следующих качеств НЭЭ [2, 3]:

- многоразовости и унифицируемости;
- удельной энергоемкости, Вт·ч/кг;
- максимальной развиваемой мощности, Вт;
- удельной мощности, Вт/кг.

Разработана структурная схема гибридного НЭЭ (рис. 1), в основе которого заложены следующие основные блоки:

- аккумуляторная батарея;
- блок суперконденсаторов;
- блок управления коммутацией;
- блок телеметрии.

Блок управления коммутацией состоит из повышающего преобразователя напряжения с ограничителем тока, релейных переключателей и устройства обработки и преобразования внутренних данных, в котором из сигналов с датчиков блока суперконденсаторов и аккумуляторной батареи формируются команды для обеспечения своевременных переключений на внутренние релейные переключатели гибридного НЭЭ, которые в свою очередь могут быть и в полупроводниковом исполнении [4].

В состав блока телеметрии входят датчики тока, напряжения и температуры в гибридном НЭЭ (на структурной схеме они обозначены отдельными блоками: ТЕМП, ДНБСК, ДТБСК, ДНАБ, ДТАБ, ДНВЫХ, ДТВЫХ, см. рис. 1).

Инициация импульсной нагрузки ПВКА средствами БСК. Включение запитки импульсной нагрузки ВКА (см. рис. 1) от силовых шин (23) осуществляется командой по ветви (1). При этом данная команда через командный вывод (15)

гибридного НЭЭ передается в блок управления и коммутации гибридного НЭЭ, где размыкает (6) и замыкает (9) ключ на время длительности команды. Дублирующим аналогом команды по ветви (1) является внутренняя команда по ветви (2) из УОПВД блока управления и коммутации. Данная команда генерируется в УОПВД при превышении величины тока на силовой шине от аккумуляторной батареи (19). Величина критического тока уточняется при проектировании гибридного НЭЭ.

Для предотвращения питания внутренней нагрузки гибридного НЭЭ средствами блока суперконденсаторов на силовой шине предусмотрен обходной канал (5) с блоком диодов (7), который необходим для предотвращения замыкания гальванической связи аккумуляторной батареи и нагрузки во время работы блока суперконденсаторов. Диодный блок (26) необходим для предотвращения передачи энергии от блока суперконденсаторов на блок ППНОТ в составе блока управления и коммутации гибридного НЭЭ. После того как напряжение на блоке суперконденсаторов при питании внешней нагрузки упадет ниже напряжения аккумуляторной батареи, обеспечение питания внешней нагрузки она снова возьмет на себя. Дублирующая команда по ветви (1) команда по ветви (2) может иметь некоторое запаздывание, величина которого обратно пропорциональна быстродействию УОПВД.

Заряд блока суперконденсаторов осуществляется по команде из УОПВД по ветви (3) в повышающий преобразователь напряжения с ограничителем тока (ППНОТ), в котором начинает работать схема с широтно-импульсным модулятором, повышающим входное напряжение с шин (19) до максимального напряжения блока суперконденсаторов. Команда по ветви (3) инициируется в УОПВД при поступлении в него сигнала с датчика напряжения (ДНБСК) по ветви (13) о значении ниже максимального. Внешняя команда по ветви (8) обеспечивает замыкание ключа (9) в гибридном НЭЭ, что при наличии на шинах (17) стабилизированного напряжения более 30 В может обеспечить заряд блока суперконденсаторов по шинам (22) от шин дополнительного питания (17). Под дополнительным питанием понимается энергия солнечных батарей и прочих НЭЭ космического аппарата.

В режиме инициации импульсной нагрузки ВКА при падении напряжения на блоке суперконденсаторов можно реализовать режимы запрета/разрешения заряда, но целесообразность того или иного пути необходимо подтвердить при математическом моделировании.

Коэффициент полезного действия составных частей гибридного НЭЭ должен составлять не менее 0,9.

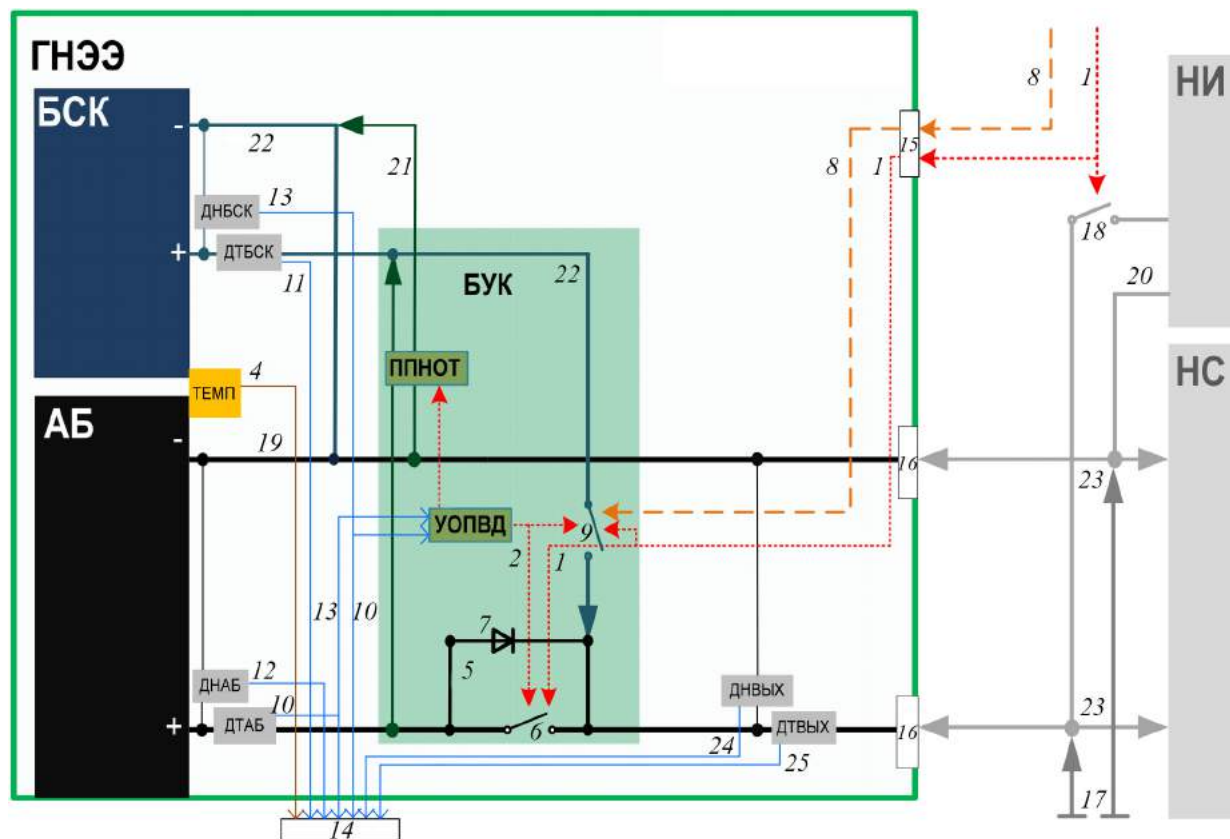


Рис. 1. Принципиальная схема гибридного накопителя электрической энергии в составе возвращаемого космического аппарата: ГНЭЭ — гибридный накопитель электрической энергии; АБ — аккумуляторная батарея; БСК — блок суперконденсаторов; НС — нагрузка стационарная; НИ — нагрузка импульсная; БУК — блок управления и коммутации; УОПВД — устройство обработки и преобразования внутренних данных; ППНОТ — повышающий преобразователь напряжения с ограничителем тока; ДТБСК — датчик тока БСК; ДНБСК — датчик напряжения БСК; ДТАБ — датчик тока АБ; ДНАБ — датчик напряжения АБ; ДНВЫХ — датчик напряжения на выходе; ДТВЫХ — датчик тока на выходе; 1–3, 8 — ветви команд; 4, 10–13 — каналы на телеметрию с аккумуляторной батареей и блоком суперконденсаторов; 5 — обводной канал; 6 — ключ разъема; 7 — блок диодов; 9, 18 — ключ; 14 — телеметрический вывод гибридного НЭЭ; 15 — командный вывод; 16 — силовые выводы гибридного НЭЭ; 17 — дополнительное питание ВКА (в орбитальном полете — от солнечных батарей и дополнительных НЭЭ космического аппарата); 19 — силовая шина; 20 — шина питания импульсной нагрузки ВКА; 21 — шина блока суперконденсаторов в гибридном НЭЭ; 22 — шины; 23 — шина питания стационарной нагрузки ВКА; 24, 25 — каналы на телеметрию с силовой шиной (19) в гибридном НЭЭ; 26 — диодный блок

Fig. 1. Schematic diagram of a hybrid electric energy storage unit as part of a return spacecraft: ГНЭЭ — a hybrid electric energy storage device; АБ — rechargeable battery; БСК — block of supercapacitors; НС — stationary load; НИ — impulse load; БУК — control and switching unit; УОПВД — device for processing and converting internal data; ППНОТ — step-up voltage converter with current limiter; ДТБСК — current sensor БСК; ДНБСК — voltage sensor БСК; ДТАБ — current sensor АБ; ДНАБ — voltage sensor АБ; ДНВЫХ — output voltage sensor; ДТВЫХ — current output sensor; 1–3, 8 — branches of teams; 4, 10–13 — channels for telemetry with a battery and a block of supercapacitors; 5 — bypass channel; 6 — connector key; 7 — block of diodes; 9, 18 — key; 14 — telemetric conclusion hybrid NEE; 15 — command output; 16 — power conclusions hybrid NEE; 17 — additional power supply of the spacecraft (in orbital flight — from solar panels and additional EE of the spacecraft); 19 — power bus; 20 — power bus pulse load PBS; 21 — bus block supercapacitors in a hybrid EES; 22 — tires; 23 — power bus stationary load VKA; 24, 25 — channels for telemetry from the power bus (19) in a hybrid EES; 26 — diode block

Волоконная брэгговская решетка гибридного НЭЭ должна быть не менее 0,999.

Оценка нагрузок перспективного возвращаемого космического аппарата. Среди отечественных ВКА самые большие стационарные и импульсные, нагрузки, как упоминалось ранее, имеет перспективный ВКА, поэтому проектирование унифицируемого гибридного НЭЭ было решено проводить с учетом удовлетворения требований

циклограммы (рис. 2): послепосадочный режим работы (от 500 до 900 Вт) должен проходить в непрерывном режиме до 120 мин, и импульсном — до 48 ч; послепосадочное функционирование перспективного ВКА — не менее 120 мин.

Аккумуляторная батарея и блок суперконденсаторов для гибридного накопителя электрической энергии. Изначально в основе гибридного НЭЭ предполагалось использование

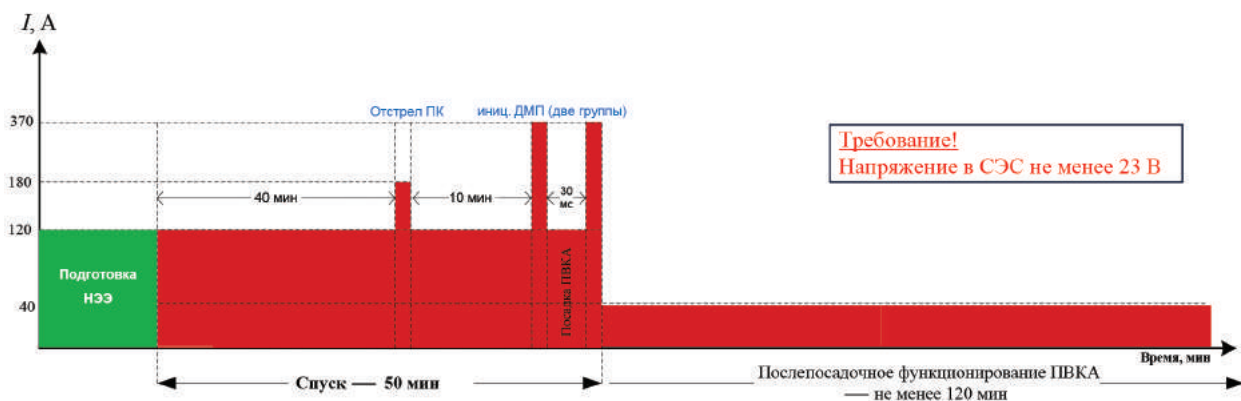


Рис. 2. Циклограмма нагрузок перспективного возвращаемого космического аппарата (ПВКА) при выполнении этапа спуска после посадочного функционирования (длительность каждого импульса не более 30 мс): ПК — парашютный контейнер; ДМП — двигатели мягкой посадки

Fig. 2. The cycle diagram of the loads of the prospective return spacecraft during the descent phase after landing operation (the duration of each pulse is not more than 30 ms): ПК — parachute container; ДМП — soft landing engines

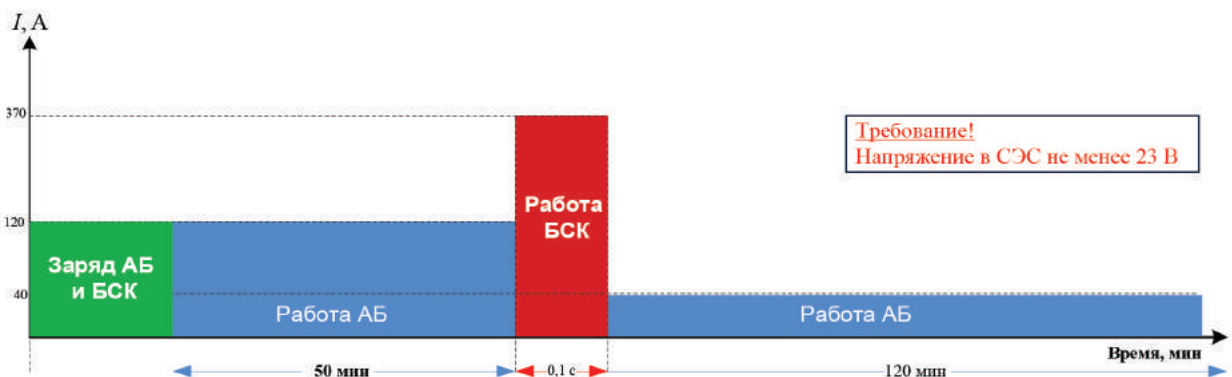


Рис. 3. Испытательная циклограмма нагрузок для математической модели системы электроснабжения перспективного возвращаемого космического аппарата на основе гибридного накопителя электрической энергии: АБ — аккумуляторная батарея; БСК — блок суперконденсаторов

Fig. 3. Test load sequence diagram for a mathematical model of a power supply system for a prospective returning spacecraft based on a hybrid electric energy storage device: АБ — rechargeable battery; БСК — block of supercapacitors

одноразовой батареи с высокой удельной энергоемкостью на основе литий-тионил-хлоридной электрохимии [1]. Но, к сожалению, одноразовая батарея является первичным источником электрической энергии и не может быть использована для перезаряжаемого унифицированного гибридного НЭЭ. После длительного анализа современных НЭЭ выбор пал на литий-ионные аккумуляторы с феррофосфатным катодом [6, 12]:

Емкость не менее, А·ч	135
Катодный материал	LiFePO ₄
Удельная энергоемкость, не менее, Вт·ч/кг	150
Допустимые токи заряд/разряд, А	90/100
Максимальное напряжение (НРЦ), В	3,7
Минимальное напряжение, В	2,5
Саморазряд за 2 мес, %	0,5
Количество циклов при 100 %-ной глубине разряда, не менее	3000

Диапазон рабочих температур, °С от 0 до +60
Срок службы, не менее, лет 15

Как указано выше, блок суперконденсаторов следует собирать из *k* последовательных суперконденсаторов для набора необходимого максимального напряжения и из *П* — параллельных ветвей с данными суперконденсаторами (4).

Параметры для математического моделирования системы электроснабжения перспективного возвращаемого космического аппарата на основе гибридного накопителя электрической энергии. Для разработки имитационной математической модели системы электроснабжения перспективного возвращаемого космического аппарата на основе гибридного НЭЭ с учетом предварительных теоретических оценок циклограмма (см. рис. 2) была сведена к испытательной циклограмме (рис. 3).

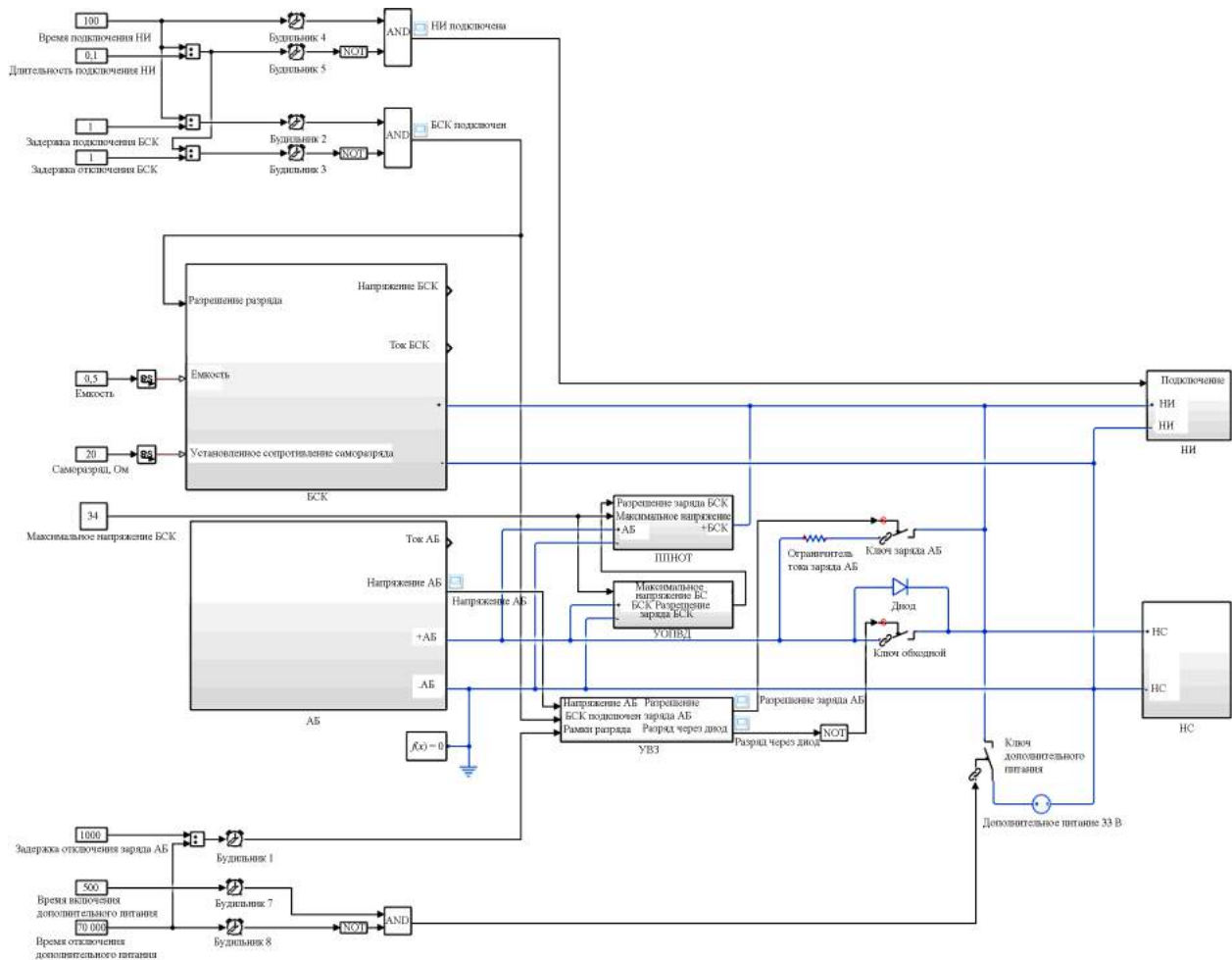


Рис. 4. Образец математической модели системы электроснабжения перспективного возвращаемого космического аппарата на основе схемы гибридного накопителя электрической энергии в MATLAB/Simulink (см. рис. 1)

Fig. 4. A sample of a mathematical model of the power supply system of a promising returning spacecraft based on a hybrid electric energy storage circuit in MATLAB / Simulink (see Fig. 1)

Основные входные параметры для имитационной математической модели, согласно некоторым данным по нагрузкам перспективного ВКА (эквивалентные сопротивления) и вышеуказанным оценкам [13]:

Емкость блока суперконденсаторов, Ф	1,5
Максимальное напряжение блока суперконденсаторов, В	33
Саморазрядное сопротивление блока суперконденсаторов, Ом	10
Електроемкость аккумуляторной батареи, А·ч	150
Напряжение аккумуляторной батареи, В	29,6
Напряжение дополнительного питания, В	33
Эквивалентное сопротивление стационарной нагрузки в СЭС, Ом	0,4
Эквивалентное сопротивление импульсной нагрузки в СЭС, Ом	0,2

Электрические параметры суперконденсаторов и физика их работы для разработки адекватной имитационной математической модели уточнялись и по последним научным исследованиям в области суперконденсаторов [16–21].

Результаты и обсуждение

Математическое моделирование гибридного НЭЭ в системе электроснабжения перспективно ВКА проводилось по схеме (рис. 4).

Получены результаты (рис. 5) моделирования по циклограмме (см. рис. 3). Аккумуляторная батарея в моделировании не участвовала. На графике (см. рис. 5) слева наблюдается режим заряда блока суперконденсаторов, который составил 100 с. Далее — 3000 с (50 мин) — продолжительное практически незаметное падение напряжения блока суперконденсаторов, вызванное его саморазрядом. В момент времени 3035 с длительностью 0,1 с наблюдался импульс тока на нагрузке 235 А, а напряжение при этом упало

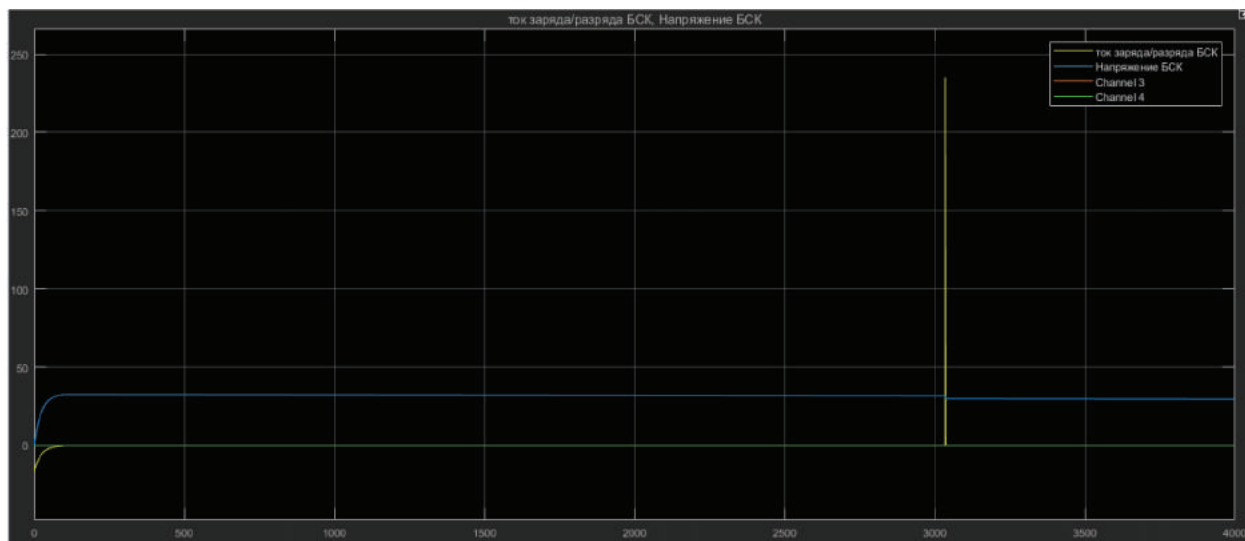


Рис. 5. Результаты математического моделирования по циклограмме рис. 2 (без учета аккумуляторной батареи)
Fig. 5. The results of mathematical modeling according to the cyclogram Fig. 2 (excluding battery)

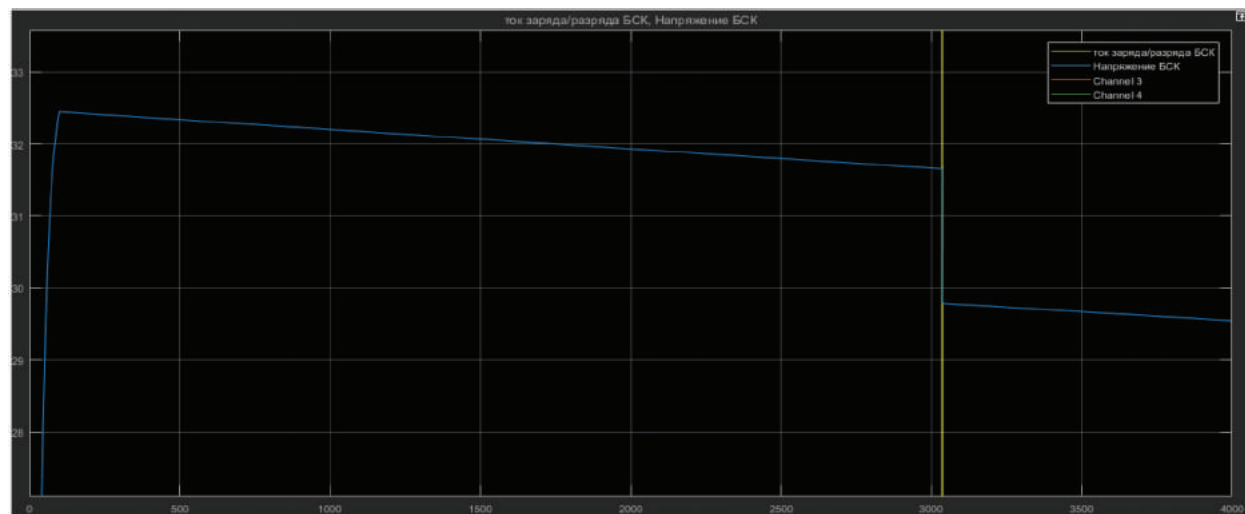


Рис. 6. Падение напряжения блока суперконденсаторов при импульсе электрического тока
Fig. 6. Voltage drop of a block of supercapacitors with an electric current pulse

с 34 до 29,6 В (см. рис. 6). Это свидетельствует о том, что блок суперконденсаторов способен обеспечить кратковременное питание всей нагрузки перспективного ВКА в течение 0,1 с без падения напряжения ниже напряжения аккумуляторной батареи, которое с учетом сборки из восьми ячеек по 3,5 В составит не более 29,6 В.

Отладка схемы рис. 3 в настоящее время продолжается, но основные результаты подтвердили возможность обеспечения всей нагрузки перспективного ВКА средствами блока суперконденсаторов.

Важной проблемой, которую необходимо решить при дальнейших моделировании и проектировании гибридного НЭЭ является контроль трех источников энергии с различным напряжением:

- внешнего дополнительного питания — 33 В;

- блока суперконденсаторов — 34 В;
- аккумуляторной батареи — 29,6 В.

При этом важно обеспечить высокие живучесть и надежность гибридного НЭЭ. К примеру, введение многочисленных диодных блоков для защиты от перезаряда отдельных НЭЭ в гибридном накопителе ведет к уменьшению КПД гибридного НЭЭ и существенно влияет на рост массы гибридного НЭЭ и дополнительные тепловые потери на них, поэтому интенсивно продолжается отладка математической модели рис. 4. Для контроля процессов автоматического контроля заряда/разряда необходима глубокая проработка логики блока управления и коммутации гибридного НЭЭ.

Тем не менее при проработке модели рис. 4 было подтверждено выполнение требований циклограммы рис. 3.

Удельная энергоёмкость гибридного НЭЭ по предварительным расчётам и самым завышенным характеристикам составных частей (диодов, силовых ключей и т. п.) может составить не более 100 Вт·ч/кг. Удельная мощность аккумуляторной батареи составила — 150, блока суперконденсаторов — 600 Вт/кг.

В итоге удельная мощность гибридного НЭЭ может составить не менее 600 Вт/кг, что является искомым результатом.

Выводы

1. По результатам проведенных тестов были уточнены предварительно рассчитанные электрические параметры аккумуляторной батареи и суперконденсаторов в составе гибридного НЭЭ и рассчитаны его удельные энергоёмкость и мощность применительно к СЭС перспективных ВКА.

2. С учетом уточненных параметров блока суперконденсаторов и временных интервалов заряда/разряда, адекватных циклограмме рис. 3, доказана возможность обеспечения всей нагрузки перспективного ВКА средствами блока суперконденсаторов на время 0,1 с, что является суммой трех импульсов электрического тока по 30 мс (эквивалент подрыву пиросредств посадки перспективного ВКА).

Список литературы

- [1] Носкин Г.В., Харагезов Е.И., Хаванов Е.С., Бесчастный Р.А. Первичные химические источники тока в электропитании пилотируемых возвращаемых космических аппаратов // Космическая техника и технологии, 2019. № 2(19). С. 15–24.
- [2] Cleveland C.J., Morris Ch.G. Handbook of energy. Waltham, MA [etc.] : Elsevier, 2006, p. 1454.
- [3] Соустин Б.П., Иванчура В.И., Чернышев А.И., Исляев Ш.Н. Системы электропитания космических аппаратов. Новосибирск: Наука, 1994, С. 318.
- [4] Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Высш. шк., 1964. С. 730.
- [5] Панкрашкин А. Ионисторы Panasonic: физика, принцип работы, параметры // Компоненты и технологии, 2006. № 9 (62). С. 12–17.
- [6] Jinrong Qian Li-ion battery-charger solutions for JEITA compliance // Texas Instruments Incorporated. Analog Applications J., 2010, no. 10, pp. 8–11.
- [7] Таганова А.А., Бубнов Ю.И., Орлов С.Б. Герметичные химические источники тока: Элементы и аккумуля-

торы. Оборудование для испытаний и эксплуатации: Справочник. СПб.: Химиздат, 2005. 264 с.

- [8] Бобрикова И.Г. Введение в электрохимические технологии. Новочеркасск: Южно-Российский государственный политехнический университет, 2017. 184 с.
- [9] Коровин Н.В. Новые химические источники тока. М: Энергия, 1978, 184 с.
- [10] Gerald Halpert, Harvey Frank, and Subbarao Surampudi Batteries and Fuel Cells in Space // The Electrochemical Society Interface, 1999, no. 8, pp. 25–30.
- [11] Чуриков А.В., Казаринов И.А. Современные источники тока / Электронный вариант курса лекций. Саратов, 2008. 49 с. URL: https://www.studmed.ru/churikov-av-kazarinov-ia-sovremennye-himicheskie-istochniki-toka_c35e51ca828.html (дата обращения 18.01.2019).
- [12] Батраков Ю.А., Туманов Б.И., Алашкин В.М., Ромадин В.Ф. Литий ионная батарея с феррофосфатным катодом: Патент РФ № 2373614. URL: <https://findpatent.ru/patent/237/2373614.html> (дата обращения 18.01.2019).
- [13] Conway B.E. Electrochemical Supercapacitors. Scientific Fundamentals and Technological Applications. N.Y.: Springer, 1999, 736 p.
- [14] Belyakov A.I., Brintsev A.M. Transient Processes in High Power Discharge of Electrochemical Capacitors // Proceedings of the 13th Int. Sem. on Double Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices, December 8–10, 2003, Deerfield Beach, FL, USA.
- [15] Belyakov A.I. Application of Large Supercapacitors Today and Tomorrow // Proc. of power systems world-98. USA, Santa Clara, 1998.
- [16] Galizzioli D., Tantardini F., Trasatti S. Ruthenium Dioxide: A New Electrode Material. 1. Behavior in Acid Solutions of Inert Electrolytes // J. Appl. Electrochem, 1974, v. 4, p. 57.
- [17] Belyakov A.I., Brintsev A.M. Development and application of Combined Capacitors: Double Electric Layer — Pseudocapacity // Proc. of the 7th Intern. Seminar on Double Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices. USA, Deerfield Beach, FL, 1997.
- [18] Khomenko V., Raymundo-Pinero E., Beguin F. Development of High Performance Hybride Supercapacitors Based on α -MnO₂/Carbon Nanotubes Composites // Conf. proceedings «New Carbon Based Materials for Electrochemical Energy Storage Systems: Batteries, Supercapacitors and Fuel Cells» / Ed. I.V. Barsukov. USA, Argonne: Springer Nature., 2003, pp. 33–40
- [19] Morimoto T., Tsushima M., Che Y. Hybrid Capacitors Using Organic Electrolytes // Electrochemical Capacitors and Hybride Power Sources. R.J. Brodd, Elchem. Soc., Pennington, N.D., 2002, v. 7, 357 p.
- [20] Suematzu S., Shkolnik N. Advanced Supercapacitors Using New Electroactive Polymers // Advanced Capacitor World Summit 2005. USA, San Diego CA, 2005, pp. 45–54.
- [21] Belyakov A.I. Asymmetric Type Electrochemical Capacitors // Electrochemical Capacitor and Hybride Power Sources / Ed. R.J. Brodd, Elchem. Soc., Pennington, N.D., v. 7, 2002, 121–139.

Сведения об авторах

Носкин Герман Вениаминович — канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник ПАО РКК «Энергия», post2@rsce.ru

Хаванов Егор Сергеевич — аспирант, инженер ПАО РКК «Энергия», post2@rsce.ru

Бесчастный Роман Александрович — инженер ПАО РКК «Энергия», post2@rsce.ru

Поступила в редакцию 19.04.2019.

Принята к публикации 15.07.2019.

HYBRID ELECTRIC POWER STORAGE BASED ON LITHIUM-ION BATTERIES AND SUPERCAPACITORS BLOCKS FOR POWER SUPPLY SYSTEM OF EARTH RETURN SPACECRAFT

G.V. Noskin, E.S. Khavanov, R.A. Beschastnyy

S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia (RSC Energia), 4a, Lenin st., 141070, Korolev, Moscow reg., Russia
post@rsce.ru

A block diagram of the hybrid electric energy storage device based on a lithium-ion battery and supercapacitors block for a return spacecraft has been developed. A supercapacitors block is included in the hybrid power storage for realizing high short-term power when powering the ship's pyrotechnic facilities. To clarify the electrical parameters of the storage units, taking into account the maximum load requirements of the maximum load requirements of the returned spacecraft, the imitation mathematical model has been developed. According to the results of the tests and addition calculations, the main parameters of the units were clarified. The specific energy intensity and power density of the hybrid source applied to a perspective returned spacecraft were calculated.

Keywords: hybrid electric power storage, power supply system, lithium-ion batteries, perspective returned spacecraft, supercapacitor, imitation mathematical model

Suggested citation: Noskin G.V., Khavanov E.S., Beschastnyy R.A. *Gibridnyy nakopitel' elektricheskoy energii na osnove lityi-ionnykh akkumulyatorov i blokov superkondensatorov dlya sistem elektrosnabzheniya vozvrashchaemykh kosmicheskikh apparatov* [Hybrid electric power storage based on lithium-ion batteries and supercapacitors blocks for power supply system of Earth return spacecraft]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 4, pp. 39–48. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-39-48

References

- [1] Noskin G.V., Kharagezov E.I., Khavanov E.S., Beschastnyy R.A. *Pervichnye khimicheskie istochniki toka v elektrosnabzhenii pilotiruemykh vozvrashchaemykh kosmicheskikh apparatov* [Primary Chemical Power Sources in Power Supply for Manned Returnable Spacecraft] *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii* [Space Engineering and Technology], 2019, no. 2 (19), pp. 15–24.
- [2] Cleveland C.J., Morris Ch.G. *Handbook of energy*. Waltham, MA [etc.]: Elsevier, 2006, p. 1454.
- [3] Soustin B.P., Ivanchura V.I., Chernyshev A.I., Islyayev Sh.N. *Sistemy elektropitaniya kosmicheskikh apparatov* [Power supply systems of space vehicles]. Novosibirsk: Nauka [Science], 1994, p. 318.
- [4] Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki* [Theoretical foundations of electrical engineering]. Moscow: Vysshaya shkola [Higher School], 1964, p. 730.
- [5] Pankrashkin A. *Ionistory Panasonic: fizika, printsip raboty, parametry* [Ionistors Panasonic: physics, principle of operation, parameters] *Komponenty i tekhnologii* [Components and technologies], 2006, no. 9 (62), pp. 12–17.
- [6] Jinrong Qian Li-ion battery-charger solutions for JEITA compliance. Texas Instruments Incorporated. *Analog Applications Journal*, 2010, no. 10, pp. 8–11.
- [7] Taganova A.A., Bubnov Yu.I., Orlov S.B. *Germetichnye khimicheskie istochniki toka: Elementy i akkumulyatory. Oborudovanie dlya ispytaniy i ekspluatatsii: Spravochnik* [Sealed chemical current sources: cells and batteries. Testing and operation equipment]. Saint Petersburg: Khimizdat, 2005, 264 p.
- [8] Bobrikova I.G. *Vvedenie v elektrokhimicheskie tekhnologii* [Introduction to electrochemical technology]. Novocherkassk: Yuzhno-Rossiyskiy gosudarstvennyy politekhnicheskii universitet [South Russian State Polytechnic University], 2017, 184 p.
- [9] Korovin N.V. *Novye khimicheskie istochniki toka* [New chemical current sources]. Moscow: Energiya, 1978, 184 p.
- [10] Gerald Halpert, Harvey Frank, and Subbarao Surampudi *Batteries and Fuel Cells in Space*. The Electrochemical Society Interface, 1999, no. 8, pp. 25–30.
- [11] Churikov A.V., Kazarinov I.A. *Sovremennye istochniki toka / Elektronnyy variant kursa lektsiy* [Modern current sources / Electronic version of the course of lectures]. Saratov, 2008. 49 p. URL: https://www.studmed.ru/churikov-av-kazarinov-ia-sovremennye-himicheskie-istochniki-toka_c35e51ca828.html (accessed 18.01.2019).
- [12] Batrakov Yu.A., Tumanov B.I., Alashkin V.M., Romadin V.F. *Lityi ionnaya batariya s ferfosfatnym katodom* [Lithium-ion battery with a ferrophosphate cathode]: Patent of the Russian Federation no. 2373614. URL: <https://findpatent.ru/patent/237/2373614.html> (accessed 18.01.2019).
- [13] Conway B.E. *Electrochemical Supercapacitors. Scientific Fundamentals and Technological Applications*. N.Y.: Springer, 1999, 736 p.
- [14] Belyakov A.I., Brintsev A.M. *Transient Processes in High Power Discharge of Electrochemical Capacitors*. Proceedings of the 13th International Seminar on Double Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices, December 8–10, 2003, Deerfield Beach, FL, USA.
- [15] Belyakov A.I. *Application of Large Supercapacitors Today and Tomorrow*. Proc. of power systems world-98. USA, Santa Clara, 1998.
- [16] Galizzoli D., Tantardini F., Trasatti S. *Ruthenium Dioxide: A New Electrode Material. 1. Behavior in Acid Solutions of Inert Electrolytes*. *J. Appl. Electrochem*, 1974, v. 4, p. 57.
- [17] Belyakov A.I., Brintsev A.M. *Development and application of Combined Capacitors: Double Electric Layer — Pseudocapacity*. Proc. of the 7th Intern. Seminar on Double Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices. USA, Deerfield Beach, FL, 1997.
- [18] Khomenko V., Raymundo-Pinero E., Beguin F. *Development of High Performance Hybride Supercapacitors Based on α -MnO₂/Carbon Nanotubes Composites // Conf. proceedings «New Carbon Based Materials for Electrochemical Energy Storage Systems: Batteries, Supercapacitors and Fuel Cells» / Ed. I.V. Barsukov. USA, Argonne: Springer Nature., 2003, pp. 33–40.*

- [19] Morimoto T., Tsushima M., Che Y. Hybrid Capacitors Using Organic Electrolytes. *Electrochemical Capacitors and Hybride Power Sources*. R.J. Brodd, Elchem. Soc., Pennington, N.D., 2002, v. 7, 357 p.
- [20] Suematzu S., Shkolnik N. Advanced Supercapacitors Using New Electroactive Polymers. *Advanced Capacitor World Summit 2005*. USA, San Diego CA, 2005, pp. 45–54.
- [21] Beliakov A.I. Asymmetric Type Electrochemical Capacitors. *Electrochemical Capacitor and Hybride Power Sources* / Ed. R.J. Brodd, Elchem. Soc., Pennington, N.D., v. 7, 2002, 121–139.

Authors' information

Noskin German Veniaminovich — Cand. Sci. (Tech.), Leading research scientist of the RSC Energia, post2@rsce.ru

Khavanov Egor Sergeevich — Postgraduate, Engineer of the RSC Energia, , post2@rsce.ru

Beschastnyy Roman Aleksandrovich — Engineer of the RSC Energia, post2@rsce.ru

Received 19.04.2019.

Accepted for publication 15.07.2019.

КОНТРОЛЬ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЖИВОТНЫХ НА ЗЕМЛЕ С ПОМОЩЬЮ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ, УСТАНОВЛЕННОЙ НА РОССИЙСКОМ СЕГМЕНТЕ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

М.Ю. Беляев, Ф.А. Воронин, М.А. Харчиков

ПАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева, 141070, Московская область, г. Королев, ул. Ленина, д. 4а

post@rsce.ru

Рассмотрена задача контроля перемещения животных на Земле из космического пространства. Указано, что для решения этой задачи используется научная аппаратура, установленная на российском сегменте Международной космической станции. На примере космического эксперимента «Ураган» с аппаратурой «Икарус» рассмотрены методы и средства контроля перемещения животных. Дано краткое описание аппаратуры «Икарус» космического эксперимента «Ураган», представлен общий принцип ее работы. Описаны бортовые и наземные средства проведения эксперимента с аппаратурой «Икарус». В качестве бортовых средств представлена информационно-управляющая система, в качестве наземных — стенды имитационного моделирования и комплекс обработки целевой информации от научной аппаратуры «Икарус» (банк данных аппаратуры «Икарус»). Рассмотрены дальнейшие возможности и перспективы контроля перемещения животных и различных объектов на Земле из космического пространства.

Ключевые слова: МКС, научная аппаратура, космический эксперимент, программное обеспечение, информационно-управляющая система, мониторинг

Ссылка для цитирования: Беляев М.Ю., Воронин Ф.А., Харчиков М.А. Контроль перемещения животных на Земле с помощью научной аппаратуры, установленной на российском сегменте Международной космической станции // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2019. Т. 23. № 4. С. 49–58.

DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-49-58

На Международной космической станции (МКС) имеется орбитальная лаборатория для выполнения разнообразных исследований. В частности, на российском сегменте проводятся работы по следующим направлениям:

- человек в космосе;
- космическая биология и биотехнология;
- исследование Земли и космоса;
- физико-химические процессы и материалы в условиях космоса;
- технология освоения космического пространства;
- образование и популяризация космических исследований.

Кроме того, важным направлением исследований является отработка различных приборов и технологий для последующего их использования в решении многих научных и прикладных задач [1, 2].

В целях отработки аппаратуры, предназначенной для наблюдений за земной поверхностью и определения применимости методов оценки развития потенциально опасных и катастрофических явлений на Земле, а также изучения других происходящих процессов на российском сегменте МКС был организован космический эксперимент «Ураган» [2, 3]. Одна из его задач связана с отработкой аппаратуры, предназначенной для наблюдения за перемещениями животных на Земле, и методов их контроля. В связи с этим на российский сегмент МКС была доставлена научная аппаратура «Икарус» [4]. Отметим, что задача мониторинга миграции

животных решается на протяжении многих лет и относится к весьма важным. Считается, что понимание причин перемещения животных и птиц поможет найти ответы на такие глобальные вопросы, как причины распространения заболеваний и позволит прогнозировать потенциально опасные явления, такие, например, как извержения вулканов и др.

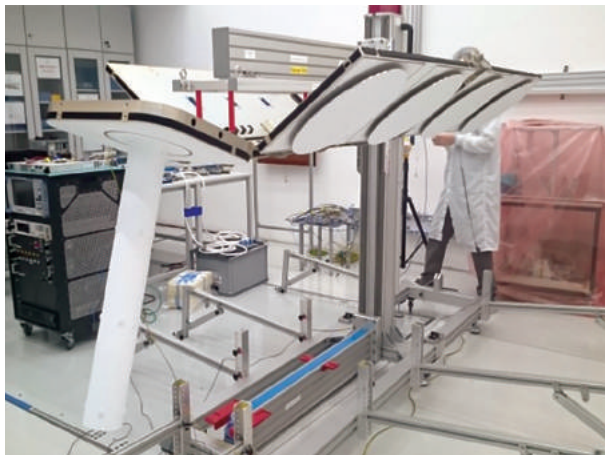
Цель работы

Целью работы является слежение из космоса за перемещением животных, на которых закреплены наземные GPS-трекеры (теги), на всей территории земной поверхности, в том числе в тех местах, где отсутствует сотовая связь. [4, 5].

Материалы и методы

Космический эксперимент с научной аппаратурой «Икарус» проводится в кооперации с Германским центром авиации и космонавтики (DLR), Институтом географии РАН, Обществом научных исследований имени Макса Планка (Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V., MPG), немецкой компанией SpaceTech GmbH.

Научная аппаратура «Икарус». Аппаратура предназначена для проведения космического эксперимента «Ураган» (постановщик — РКК «Энергия»), одной из задач которого является оценка из космоса развития на Земле потенциально опасных и чрезвычайных явлений [3]. Ее доставка и интеграция на российский сегмент МКС была осуществлена в августе 2018 г.



a



б



в

Рис. 1. Общий вид аппаратуры «Икарус»: *a* — наземные испытания антенн аппаратуры «Икарус»; *б* — подготовка управляющего компьютера аппаратуры «Икарус» к работе на российском сегменте МКС; *в* — датчики, закрепляемые на животных

Fig. 1. General view of Ikarus equipment: *a* — ground tests of the antennas of Ikarus equipment; *б* — preparation of Ikarus equipment control computer for work on the ISS Russian segment; *в* — sensors mounted on animals

В состав комплекса аппаратуры «Икарус» входят бортовые антенны, управляющий компьютер и специализированные GPS-трекеры (теги) (рис. 1, 2). Антенный блок состоит из приемной и передающей антенн, предназначенных для передачи и получения информации от тегов. Управляющий компьютер формирует файлы с целевой информацией на основе сигнала, полученного антенным блоком.

Тег определяет свое местоположение посредством системы GPS и записывает его в свою внутреннюю память. От антенного блока тег получает данные об орбите станции в формате TLE (two line elements), на основании которых рассчитывает очередное время пролета МКС над тегом. В рассчитанное время тег начинает передавать информацию на российский сегмент МКС. Для экономии заряда батареи у тега требуется высокая точность определения времени очередного пролета МКС над ним, поэтому на борту МКС аппаратура «Икарус» синхронизируется с временем GPS с точностью до одной миллисекунды.

Управление аппаратурой проводится средствами информационно-управляющей системы (ИУС) [5], а передача файлов в ЦУП-М — штатными средствами российского сегмента МКС.

Данные поступают в ЦУП-М в бинарном виде, после чего их дешифруют постановщики эксперимента, в частности специалисты немецкой и российской сторон.

Проведение эксперимента потребовало использования бортового и наземного оборудования, в том числе имеющихся аппаратно-программных средств, а также были разработаны новые средства для проведения исследований.

Бортовой сегмент. Основные задачи бортового сегмента:

- автоматизированный контроль работы целевой аппаратуры;
- управление аппаратурой;
- передача целевой информации, получаемой в ходе проведения эксперимента.

Бортовой сегмент состоит из комплекса целевых нагрузок (КЦН), ИУС и средств передачи данных.

Для облегчения процесса стандартизации и унификации вся аппаратура объединена в КЦН, что позволяет использовать стандартизированные интерфейсы по работе с научной аппаратурой в части управления, контроля и предоставления сопроводительной информации, т. е. данных о местоположении станции, TLE, точном времени и т. д.) [6, 7].

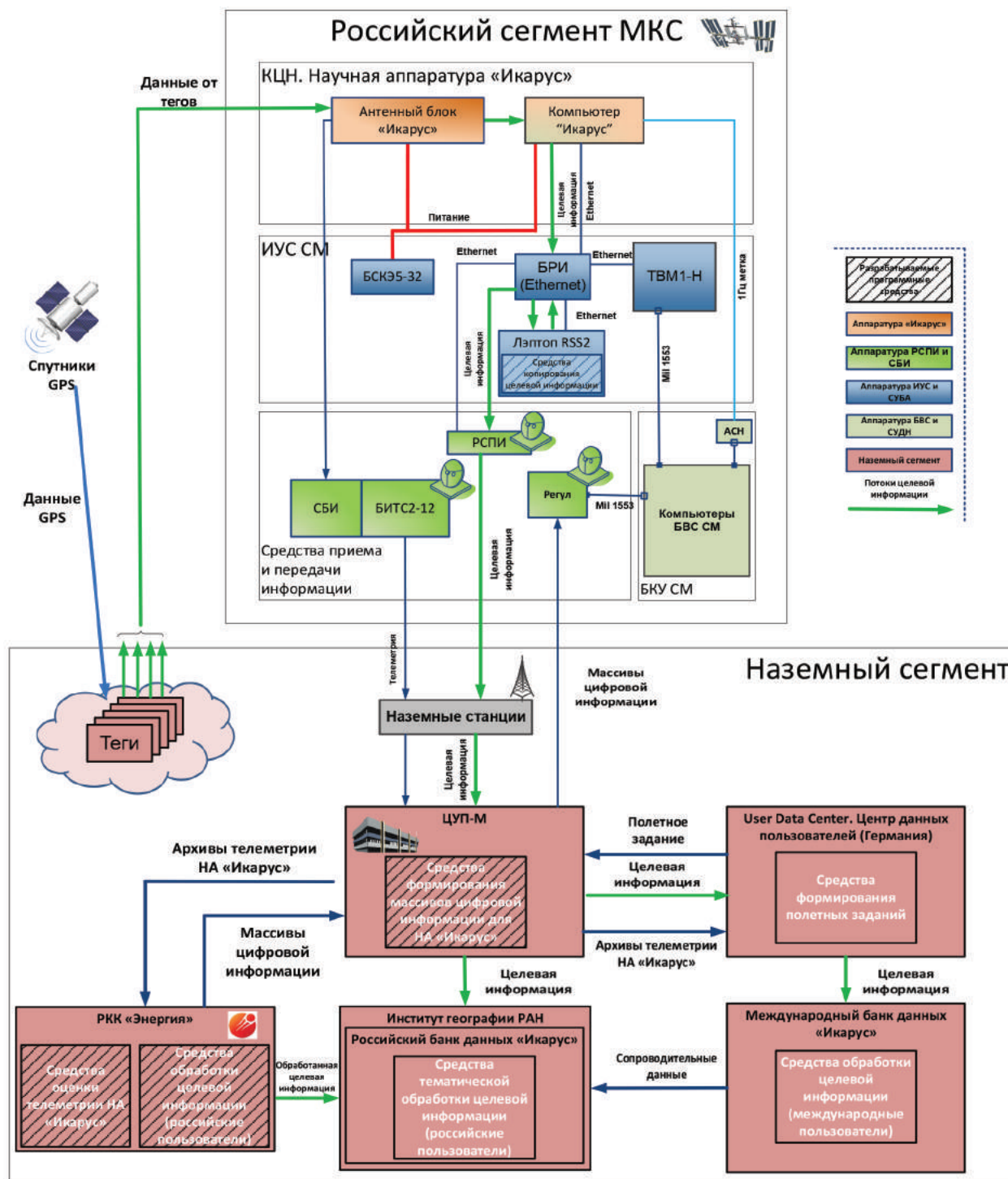


Рис. 2. Схема размещения аппаратуры «Икарус»: АСН — аппаратура спутниковой навигации; БВС — бортовая вычислительная система; БИТС — бортовая информационно-телеметрическая система; БКУ — бортовой комплекс управления; БРИ — блок размножения интерфейсов; БСКЭ5-32 — блок силовой коммутации электронных; ИУС — информационно-управляющая система; КЦН — комплекс целевых нагрузок; РСПИ — радиотехническая система передачи информации; СБИ — система бортовых измерений; СМ — служебный модуль; СУБА — система управления бортовой аппаратурой; СУДН — система управления движением и навигации; ТВМ1-Н — терминальная вычислительная машина 1 — «Наука»; ЦУП-М — центр управления полетом Москва; GPS — Global Positioning System

Fig. 2. The layout of the Ikarus equipment: АСН — satellite navigation equipment; БВС — on-board computer system; БИТС — airborne information and telemetry system; БКУ — on-board control complex; БРИ — interface breeding unit; БСКЭ5-32 — power switching unit electronic; ИУС — information management system; КЦН — a complex of target loads; РСПИ — radio engineering information transmission system; СБИ — on-board measurement system; СМ — service module; СУБА — on-board equipment control system; СУДН — traffic control and navigation system; ТВМ1-Н — terminal computing machine 1 — «Science»; ЦУП-М — Mission Control Center Moscow; GPS — Global Positioning System

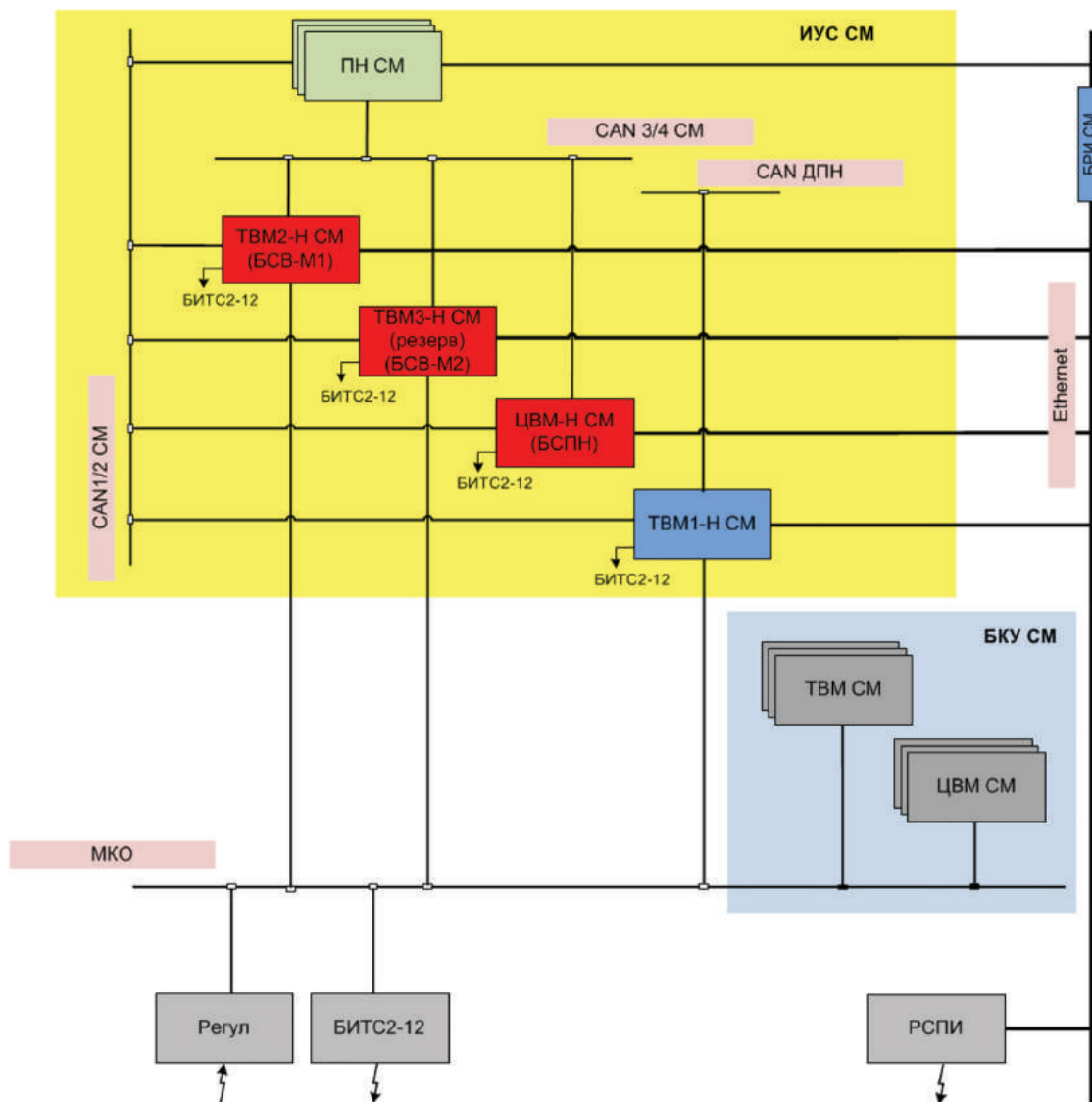


Рис. 3. Структурная схема информационно-управляющей системы: БИТС — бортовая информационно-телеметрическая система; БКУ — бортовой комплекс управления; БРИ — блок размножения интерфейсов служебного модуля; ДПН — двухосевая платформа наведения; ИУС — информационно-управляющая система; МКО — мультиплексный канал обмена; ПН — полезная нагрузка; РСПИ — радиотехническая система передачи информации; СМ — служебный модуль; ТВМ1-Н — терминальная вычислительная машина 1 — «Наука»; ЦВМ-Н — центральная вычислительная машина — «Наука»

Fig. 3. The structural diagram of the information management system: БИТС — on-board information and telemetry system; БКУ — on-board control complex; БРИ — a block of propagation of the service module interfaces; ДПН — two-axis guidance platform; ИУС — information management system; МКО — multiplexed exchange channel; ПН — payload; РСПИ — radio engineering information transmission system; СМ — service module; ТВМ1-Н — terminal computing machine 1 — «Nauka»; ЦВМ-Н — central computing machine — «Nauka»

Для решения задач автоматизированного управления полезными нагрузками в РКК «Энергия» спроектирована и разработана ИУС, представляющая собой совокупность аппаратно-программных средств, интегрированных в единую систему (рис. 3).

Основные задачи ИУС:

- управление и информационная поддержка научных экспериментов в автоматическом и ручном режимах;
- организация бортовой локальной вычислительной сети Ethernet;

- медицинское обеспечение экипажа;
- информационная и психологическая поддержка экипажа.

Информационно-управляющая система поддерживает управление аппаратурой по различным интерфейсам — CAN 2.0b, RS 422, Ethernet и др. В качестве вычислительных средств в ней используются компьютеры БКИПН (блок контроля интерфейсов полезных нагрузок), что повышает аппаратную надежность системы и обеспечивает ее унификацию [6–8].

Для управления научной аппаратурой потребовалась разработка программного обеспечения (ПО). Одним из основных принципов его разработки стала его модульность и возможность унификации между различными компьютерами ИУС. Программное обеспечение ИУС подразделяется на ядро, предоставляющее базовые функции по управлению научной аппаратурой, и на уникальное функциональное ПО, предназначенное для управления конкретной научной аппаратурой [8].

Решение задачи управления аппаратурой «Икарус» потребовало создания нового модуля управления для программного обеспечения ИУС. В феврале 2018 г. на бортовой компьютер ИУС была установлена новая версия ПО с компонентом управления научной аппаратуры «Икарус», включающим в себя следующие задачи:

- формирование на борту команд и их отправки в аппаратуру «Икарус» в автоматическом режиме или поступающих с Земли (из ЦУП-М);
- постоянный контроль телеметрии от научной аппаратуры «Икарус»;
- парирование расчетных нештатных ситуаций (НШС).

Поступающие команды подразделяются на два типа: бинарные команды и команды для реализации заданной циклограммы работы. Бинарные команды выполняются сразу после их получения: задается режим работы аппаратуры; осуществляется оперативное получение информации о различных модулях аппаратуры. При реализации заданной циклограммы работы используются командные файлы, формируемые на Земле.

Контроль работы аппаратуры осуществляется с помощью статусной информации, периодически передаваемой аппаратурой на компьютер ИУС. Набор контролируемых параметров достаточно велик, поэтому их контроль осуществляется в автоматическом режиме. В случае превышения каким-либо параметром допустимого значения информация об этом передается в ЦУП-М.

В программном обеспечении ИУС для управления научной аппаратурой «Икарус» заложены алгоритмы парирования расчетных НШС, выявленных при наземных испытаниях аппаратуры или полученных от ее разработчиков. С помощью имеющихся возможностей управления аппаратурой программные средства ИУС позволяют парировать многие НШС.

Еще одной задачей бортового сегмента является получение целевой информации с помощью ПО, подготавливающего информацию, направляемую научной аппаратурой, к ее сбросу на Землю. Передача информации осуществляется российскими средствами связи. Кроме ее подготовки ПО проверяет целостность данных и контролирует их вследствие ограниченности объема передаваемой в сутки информации.

Наземный сегмент. Для проектирования и разработки наземного сегмента, а также его взаимодействия с бортовым сегментом, были созданы средства, позволяющие осуществлять разработку, интеграцию, сопровождение и обработку целевых данных научной аппаратуры «Икарус». Наземный сегмент решает следующие задачи:

- формирование и ежедневную обработку управляющей информации;
- оценку контрольно-диагностических параметров аппаратуры «Икарус»;
- обработку целевых данных аппаратуры.

Космический эксперимент с научной аппаратурой «Икарус» требует ежедневного управления с Земли. В соответствии с концепцией управления все команды (бинарные или в виде файлов) проходят обработку на стендах имитационного моделирования в РКК «Энергия» из состава наземного комплекса обработки (НКО) (рис. 4). Их отличительной особенностью является возможность работы как с реальной аппаратурой, так и с моделью аппаратуры, что позволяет экономить машинное время и ускоряет процесс проведения испытаний [9].

Обеспечение обработки управляющей информации для научной аппаратуры «Икарус» стало возможно за счет интеграции ее математической модели с реальным ПО в состав стенда. Такой подход позволяет полностью моделировать работу управляющего компьютера.

Формирование файлов с управляющей информацией осуществляется аппаратно-программными средствами ЦУП. На основе данных, которые предоставляют разработчики аппаратуры, научная аппаратура «Икарус» поддерживает возможность отслеживания положения до 120 наземных датчиков одновременно, поэтому для охвата всех функционирующих тегов необходима ежедневная реконфигурация списка опрашиваемых тегов, что реализуется путем отправки командного файла на российский сегмент МКС, где средствами ИУС файл маршрутизируется и доставляется до управляющего компьютера научной аппаратуры «Икарус». Файлы также содержат команды для управления тегами и команды на получение расширенного набора данных о состоянии различных модулей аппаратуры «Икарус», а также различные конфигурационные настройки.

При проведении эксперимента использовались средства оценки контрольно-диагностических параметров аппаратуры [10]. Для осуществления оперативного контроля за ходом проведения эксперимента, выявления тенденций, которые могут повлечь за собой возникновение НШС, были применены средства оценки параметров в пост-реальном времени. Анализ осуществлялся на основе архивов, формируемых компьютером ИУС.

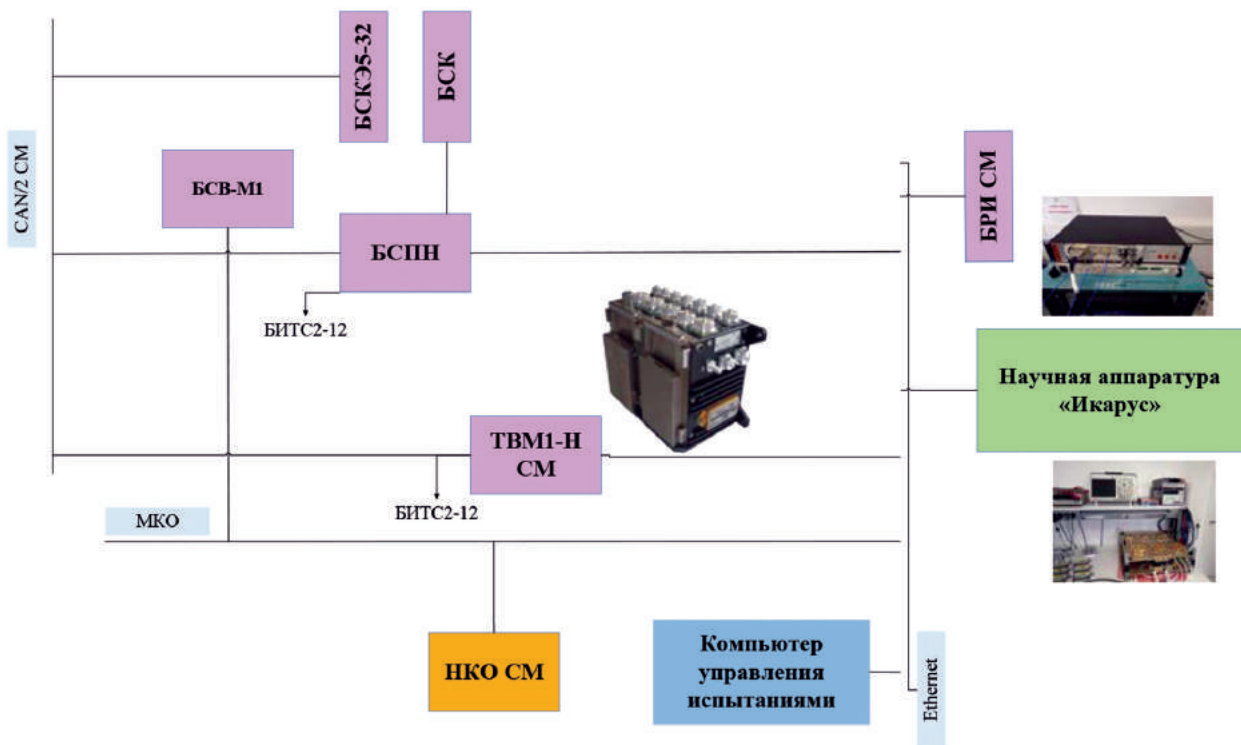


Рис. 4. Структурная схема стенда имитационного моделирования с моделью «Икарус»: БИТС — бортовая информационно-телеметрическая система; БРИ — блок размножения интерфейсов служебного модуля; БСВ-М — блок синхронизации времени — модернизированный; БСК — блок силовой коммутации; БСКЭ5-32 — блок силовой коммутации электронный; МКО — мультиплексный канал обмена; НКО — наземный комплекс отработки; ПН — полезная нагрузка; РСПИ — радиотехническая система передачи информации; СМ — служебный модуль; ТВМ1-Н — терминальная вычислительная машина 1 — «Наука»

Fig. 4. Structural diagram of a simulation stand with the Ikarus model: БИТС — airborne information and telemetry system; БРИ — a block of propagation of the service module interfaces; БСВ-М — time synchronization unit — modernized; БСК — power switching unit; БСКЭ5-32 — power switching unit electronic; МКО — multiplexed exchange channel; НКО — ground-based mining complex; ПН — payload; РСПИ — radio engineering information transmission system; СМ — service module; ТВМ1-Н — terminal computing machine 1 — «Nauka»

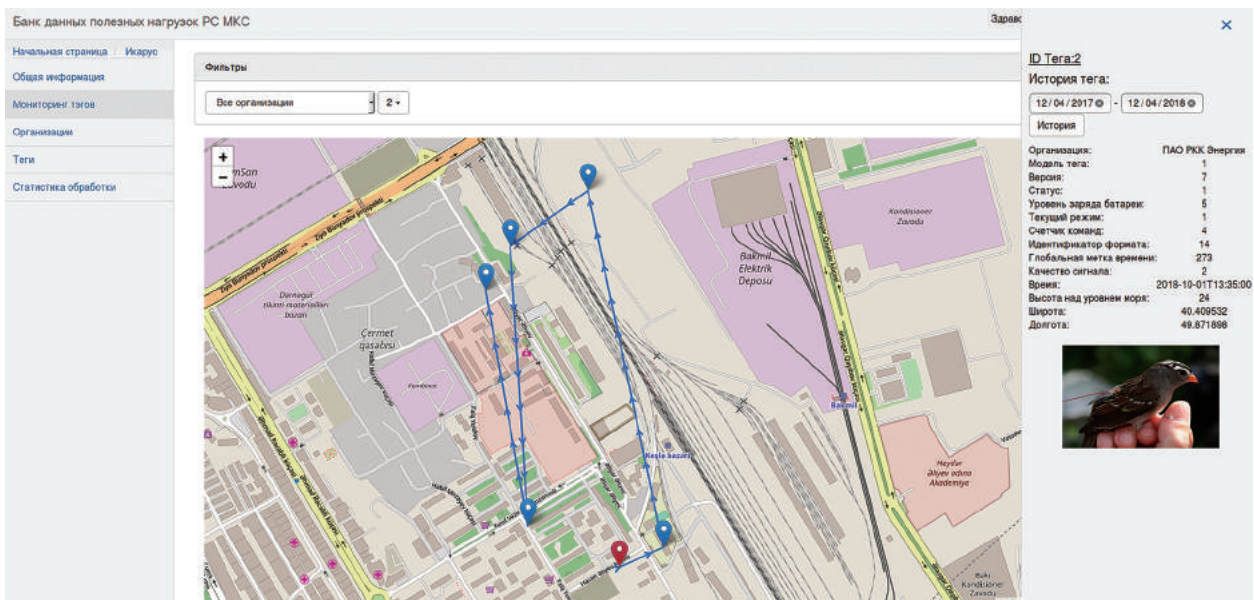


Рис. 5. Главное окно банка данных научной аппаратуры «Икарус»
Fig. 5. The main window of the database of scientific equipment «Ikarus»

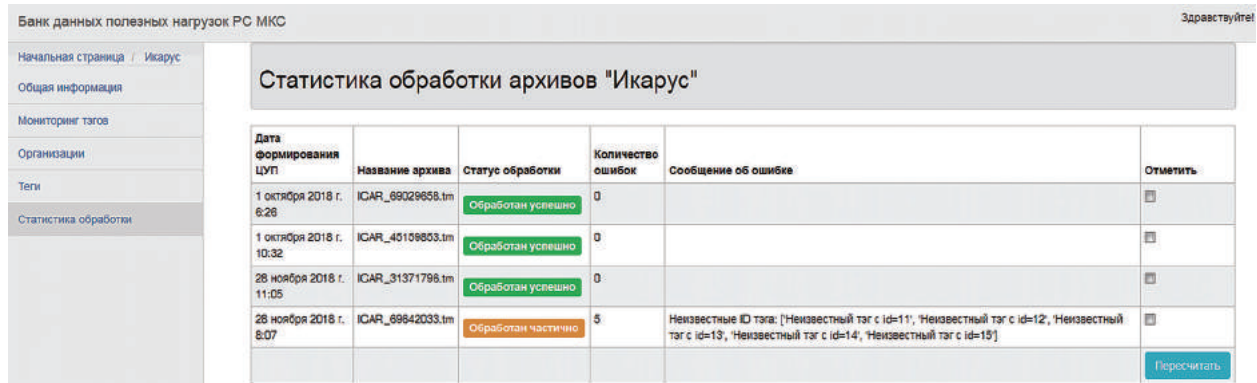


Рис. 6. Интерфейс пользователя со статистикой обработки целевой информации
 Fig. 6. User interface with statistics for processing target information

Архивы поступали в ЦУП, после чего проходили обработку с помощью аппаратно-программных средств НКО. Информация записывалась в базу данных, что обеспечивало доступ специалистов к ней на протяжении всего времени проведения эксперимента. Средства также поддерживали возможность отправки архивов разработчикам аппаратуры для более детального анализа данных. Анализ данных позволил выявить тенденции и спрогнозировать НШС в работе аппаратуры. Помимо этого с помощью данных средств были проанализированы уже возникшие НШС.

Для обработки целевой информации эксперимента потребовалась разработка средств дешифрования целевых данных космического эксперимента «Ураган» с научной аппаратуры «Икарус». С этой целью, а также для решения задач каталогизации и предоставления данных участникам эксперимента в РКК «Энергия» был разработан банк данных для научной аппаратуры «Икарус». Экспериментаторы и специалисты по научной аппаратуре составили следующие требования к этому банку данных:

- визуализация информации о перемещении тегов;
- контроль несанкционированного использования тегов;
- контроль работоспособности тегов;
- архивация и хранение данных на всем периоде эксплуатации научной аппаратуры «Икарус».

Поскольку основная информация — это данные о местоположении тегов, целесообразно наносить данную информацию на карту изучаемого участка земной поверхности (рис. 5). Для этого в состав банка данных был интегрирован картографический сервер на основе карт Open Street Map (OSM), что дало возможность работать с системой без подключения к интернету.

В ходе эксплуатации тегов возможны их поломка или формирование ложных данных. Система осуществляет контроль и оповещает пользователя, если какой-либо тег присылает

недоверенную информацию либо не присылает данные в течение длительного времени. Для этого разработан специальный интерфейс администратора системы.

В банке данных хранится полный список организаций, за которыми закреплены те или иные теги: как российские, так и зарубежные. Получение информации о зарубежных тегах (информация об организации — владелец тега; животном, на котором тег закреплен, и время установки тега) происходит за счет взаимодействия с центром данных пользователей, находящимся в Германии.

Все теги имеют уникальные идентификаторы, и как только с российского сегмента МКС поступает целевая информация с данными от тегов, информации о которых нет в системе, специалисты незамедлительно оповещаются о возникшей ошибке. Благодаря этому можно определить, что теги были несанкционированно использованы какой-либо организацией.

Система осуществляет архивацию информации, которая поступает от научной аппаратуры «Икарус» — в «сыром» и обработанном виде. Таким образом, в случае появления модернизированных алгоритмов по обработке есть возможность провести повторную обработку имеющихся архивов или архивов, при дешифровании которых возникла ошибка. Система автоматически перерабатывает ошибочные данные. Пользователю также доступен интерфейс (рис. 6), где он может инициировать данный процесс в ручном режиме.

В рамках эксперимента предполагается также создать единую систему предоставления данных ее пользователям, которыми могут быть как коммерческие, так и государственные компании, расположенные на территории РФ или за ее пределами. Система может предоставлять данные о перемещении объекта непосредственно пользователю, за которым закреплен объект. Таким образом, будет доступен единый сервис предоставления данных по контролю перемещения объектов.

В настоящее время закончена разработка первой версии системы. Следующий этап — отработка системы с реальными данными тегов, после чего будет проведена ее доработка на основе результатов проверок, тогда система будет готова для промышленной эксплуатации.

Выводы

Отработка представленной технологии на МКС — первый этап развития системы контроля перемещения животных, успешное окончание которого позволит создать такую систему по всему Земному шару, обеспечивая доступность информации об объекте на всем пути его перемещения. Именно этим вопросам посвящен космический эксперимент «Ураган» с научной аппаратурой «Икарус», который проводится на российском сегменте МКС. Впоследствии предполагается применение полученных результатов на автоматических космических аппаратах.

Кроме того, в качестве отслеживаемых объектов могут выступать перевозимые грузы, различная перемещающаяся техника, подвижные сельскохозяйственные объекты. Возможна интеграция целевых данных выполняемого эксперимента с результатами других экспериментов, проводимых на МКС в целях изучения земной поверхности [3, 11, 12].

Список литературы

- [1] Беляев М.Ю. Научные эксперименты на космических кораблях и орбитальных станциях. М.: Машиностроение, 1984. С. 264.
- [2] Беляев М.Ю., Легостаев В.П. Научная и экономическая отдача программ орбитальных станций — основа стабильного развития отечественной космонавтики // Проблемы и задачи повышения эффективности программ исследований на космических кораблях и орбитальных станциях. Сб. науч. тр. РКК «Энергия» им. С.П. Королева, 2011. Сер. XII. Вып. 1–2. С. 5–15.
- [3] Беляев М.Ю., Десинов Л.В., Караваев Д.Ю., Юрина О.А. Изучение катастрофических явлений и экологических проблем с российского сегмента МКС. // Материалы I Научных чтений памяти К.Э. Циолковского. Секция «Проблемы ракетной и космической техники», Калуга, 5–17 сентября 2015 г. Казань : Казанский ун-т, 2016. С. 79–97.
- [4] Беляев М.Ю., Викальски М., Лампен М., Легостаев В.П., Мюллер У., Науманн В., Тертицкий Г.М., Юрина О.А.

Технология изучения перемещения животных и птиц на Земле с помощью аппаратуры ICARUS на Российском сегменте МКС // Космическая техника и технологии, 2015. № 3. С. 38–51.

- [5] Волков О.Н., Воронин Ф.А., Назаров Д.А., Харчиков М.А. Решение задач управления научной аппаратурой «ИКАРУС» в Международной кооперации по изучению миграции животных с борта РС МКС // Материалы LI Научных чтений памяти К.Э. Циолковского, Калуга, 19–21 сентября 2017. Калуга: Эйдос, 2017. С. 161.
- [6] Пахмутов П.А., Скороход С.А., Бусарова Д.А. Концепция построения программного обеспечения бортовой цифровой вычислительной информационно-управляющей системы российского сегмента МКС // Тр. РКТ, 2012. Сер. 12. Вып. 3. С. 7–11.
- [7] Дунаева И.В., Воронин Ф.А., Карташев С.В., Харчиков М.А. Создание информационно-управляющей системы РС МКС: разработка и модернизация // Актуальные проблемы космонавтики: Тр. XXXIX Академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства. Москва, 27–30 января 2015 г. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. С. 396.
- [8] Воронин Ф.А., Назаров Д.С. Разработка программного обеспечения информационно-управляющей системы Международной космической станции (на примере научных экспериментов «ТЕРМИНАТОР», «МВН», «БТН-М2», «ИПИ-500») // Тр. XL Академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. С. 366–367.
- [9] Воронин Ф.А., Карташев С.В., Харчиков М.А. Создание стенда сопровождения ИУС СМ РС МКС // Тезисы докладов XX научно-технической конференции молодых ученых и специалистов. Королев: РКК «Энергия», 2014. С. 169.
- [10] Воронин Ф.А., Харчиков М.А. Сопровождение проведения научных экспериментов на Международной космической станции (на примере эксперимента «Напор-Мини РСА») // Тр. XL Академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. С. 363.
- [11] Беляев М.Ю., Десинов Л.В., Караваев Д.Ю., Сармин Э.Э., Юрина О.А. Аппаратура и программно-математическое обеспечение для изучения земной поверхности с борта российского сегмента Международной космической станции по программе «Ураган». // Космонавтика и ракетостроение, 2015. № 1. С. 63–70.
- [12] Belyaev M.Y., Cheremisin M.V., Esakov A.M. Integrated monitoring of earth surface from onboard ISS Russian segment // 69th International Astronautical Congress (IAC), Bremen, Germany, 1–5 October 2018, published by the IAF, pp. 1–9.

Сведения об авторах

Беляев Михаил Юрьевич — зам. руководителя НТЦ, начальник отдела ПАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева, post@rsce.ru

Воронин Федор Андреевич — ведущий инженер-математик ПАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева, post@rsce.ru

Харчиков Михаил Александрович — инженер-программист II категории ПАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева, post@rsce.ru

Поступила в редакцию 19.04.2019.

Принята к публикации 15.07.2019.

ANIMAL MOVEMENT CONTROL ON EARTH USING SCIENTIFIC EQUIPMENT INSTALLED ON THE ISS RS

M.Yu. Belyaev, F.A. Voronin, M.A. Kharchikov

Korolev Rocket and Space Corporation «Energia», 4a, Lenina st., 141070, Korolev, Moscow reg., Russia

post@rsce.ru

The issue of animal movement control on Earth from outer space is considered. It is indicated that scientific equipment installed on the Russian segment of the International Space Station is used for this purpose. On the example of the space experiment «Hurricane» with the equipment «Ikarus» methods and means of controlling the movement of animals are considered. A brief description of the Ikarus equipment of the Hurricane space experiment is given, the general principle of its operation is presented. Airborne and ground-based facilities for conducting an experiment with Ikarus equipment are described. An information management system is presented as airborne equipment, simulation modeling stands and a complex of processing target information from Ikarus scientific equipment (Ikarus equipment data bank) as ground-based systems. Further possibilities and prospects of controlling the movement of animals and various objects on Earth from outer space are considered.

Keywords: ISS, scientific equipment, space experiment, software, information and control system, monitoring

Suggested citation: Belyaev M.Yu., Voronin F.A., Kharchikov M.A. *Kontrol' peremeshcheniya zhivotnykh na zemle s pomoshch'yu nauchnoy apparatury, ustanovlennoy na rossiyskom segmente Mezhdunarodnoy kosmicheskoy stantsii* [Animal movement control on Earth using scientific equipment installed on the ISS RS]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 4, pp. 49–58. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-49-58

References

- [1] Belyaev M.Yu. *Nauchnye eksperimenty na kosmicheskikh korablyakh i orbital'nykh stantsiyakh* [Scientific experiments on spacecrafts and orbital stations]. Moscow: Mashinostroenie, 1984, 264 p.
- [2] Belyaev M.Yu., Legostaev V.P. *Nauchnaya i ekonomicheskaya otдача programm orbital'nykh stantsiy — osnova stabil'nogo razvitiya otechestvennoy kosmonavтики* [Scientific and economic impact of the orbital station programs is the basis of stable development of the national cosmonautics]. *Problemy i zadachi povysheniya effektivnosti programm issledovaniy na kosmicheskikh korablyakh i orbital'nykh stantsiyakh. Sbornik nauchnykh trudov RKK «Energia» im. S.P. Koroleva* [Problems and tasks of increasing the efficiency of research programs on spacecraft and orbital stations. Collection of scientific papers, RSC «Energia» them. S.P. Korolev, series XII], 2011, ser. XII, v. 1–2, pp. 5–15.
- [3] Belyaev M.Yu., Desinov L.V., Karavaev D.Yu., Yurina O.A. *Izuchenie katastroficheskikh yavleniy i ekologicheskikh problem s rossiyskogo segmenta MKS* [Study of catastrophic phenomena and environmental problems from the Russian segment of the ISS]. *Trudy L Chteniy K.E. Tsiolkovskogo. Sektsiya «Problemy raketnoy i kosmicheskoy tekhniki»*, [Materials of the 50th Tsiolkovsky readings. Section «Problems of rocket and space technique»] Kaluga, 5–17 September 2015. Kazan': Kazanskiy un-t, 2016, pp. 79–97.
- [4] Belyaev M.Yu., Vikel'ski M., Lampen M., Legostaev V.P., Myuller U., Naumann V., Tertitskiy G.M., Yurina O.A. *Tekhnologiya izucheniya peremeshcheniya zhivotnykh i ptits na Zemle s pomoshch'yu apparatury ICARUS na Rossiyskom segmente MKS* [Technology of studying the movement of animals and birds on the Ground using ICARUS equipment on the Russian segment of the ISS]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii* [Space engineering and technologies], 2015, no. 3, pp. 38–51.
- [5] Volkov O.N., Voronin F.A., Nazarov D.A., Kharchikov M.A. *Reshenie zadach upravleniya nauchnoy apparatury «IKARUS» v Mezhdunarodnoy kooperatsii po izucheniyu migratsii zhivotnykh s borta RS MKS* [Solving the problems of management of scientific equipment «ICARUS» in the International cooperation on the study of animal migration from the ISS RS.]. *Materialy 52-kh Nauchnykh chteniy pamyati K.E. Tsiolkovskogo* [Materials of the 52th Tsiolkovsky readings] Kaluga, 19–21 September 2017. Kaluga: Eydos, 2017, p. 161.
- [6] Pakhmutov P.A., Skorokhod S.A., Busarova D.A. *Kontseptsiya postroeniya programmnoy obespecheniya bortovoy tsifrovoy vychislitel'noy informatsionno-upravlyayushchey sistemy rossiyskogo segmenta MKS* [The concept of building software onboard digital computer information management system of the Russian segment of the ISS.]. *Trudy RKT* [Materials of the RST], 2012, ser. 12, v. 3, pp. 7–11.
- [7] Dunaeva I.V., Voronin F.A., Kartashev S.V., Kharchikov M.A. *Sozdanie informatsionno-upravlyayushchey sistemy RS MKS: razrabotka i modernizatsiya // Aktual'nye problemy kosmonavтики: Trudy XXXIX akademicheskikh chteniy po kosmonavtike, posvyashchennykh pamyati akademika S.P. Koroleva i drugikh vydayushchikhsya otechestvennykh uchenykh — pionerov osvoeniya kosmicheskogo prostranstva* [Proceedings of XXXIX Academic readings on cosmonautics]. Moscow: MG TU im. N.E. Bauman, 2015, p. 396, 555 p.
- [8] Voronin F.A., Nazarov D.S. *Razrabotka programmnoy obespecheniya informatsionno-upravlyayushchey sistemy Mezhdunarodnoy kosmicheskoy stantsii (na primere nauchnykh eksperimentov «TERMINATOR», «MVN», «BTN-M2», «IPI-500»)* [Software development of the information and control system of the International space station (on the example of scientific experiments «TERMINATOR», «MVN», «BTN-M2», «IPI-500»)]. *XL Akademicheskikh chteniy po kosmonavtike* [XL Academic readings in astronautics]. Moscow: MG TU im. N.E. Bauman, 2016, pp. 366–367.
- [9] Voronin F.A., Kartashev S.V., Kharchikov M.A. *Sozdanie stenda soprovozhdeniya IUS SM RS MKS* [The creation of the support stand ICS ISS RS]. *Tezisy dokladov XX nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov* [Abstracts of the XX scientific and technical conference of young scientists and specialists. RSC «Energia»]. Korolev: RKK «Energia», 2014, p. 169.

- [10] Voronin F.A., Kharchikov M.A. *Soprovozhdenie provedeniya nauchnykh eksperimentov na Mezhdunarodnoy kosmicheskoy stantsii (na primere eksperimenta «Napor-Mini RSA»)* [Support of scientific experiments on the International space station (on the example of the experiment «Napor-Mini RSA»)]. XL Akademicheskie chteniya po kosmonavtike [XL Academic readings in astronautics]. Moscow: MGТУ im. N.E. Baumana, 2016, p. 363.
- [11] Belyaev M.Yu., Desinov L.V., Karavaev D.Yu., Sarmin E.E., Yurina O.A. *Apparatura i programmno-matematicheskoe obezpechenie dlya izucheniya zemnoy poverkhnosti s borta rossiyskogo segmenta Mezhdunarodnoy kosmicheskoy stantsii po programme «Uragan»* [Hardware and software for the study of the Earth's surface from the Board of the Russian segment of the international space station under the program «Uragan»]. Kosmonavtika i raketostroenie [Cosmonautics and rocket engineering], 2015, no. 1, pp. 63–70.
- [12] Belyaev M.Y., Cheremisin M.V., Esakov A.M. Integrated monitoring of earth surface from onboard ISS Russian segment. 69th International Astronautical Congress (IAC), Bremen, Germany, 1–5 October 2018, published by the IAF, pp. 1–9.

Authors' information

Belyaev Mikhail Yur'evich — Deputy head of STC, Chief department of the RSC «Energia», post@rsce.ru
Voronin Fedor Andreevich — Lead engineer mathematician of the RSC «Energia», post@rsce.ru
Kharchikov Mikhail Aleksandrovich — software engineer II of the RSC «Energia», post@rsce.ru

Received 19.04.2019.

Accepted for publication 15.07.2019.

УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫЙ ФОТОПРИЕМНЫЙ МОДУЛЬ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ФОТОКАТОДОМ GAN/GAALN НА САПФИРЕ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПЛЕКСАХ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

Л. М. Баясный¹, Ю.Н. Гордиенко¹, Ю. К. Грузевич^{1,2},
П.С. Альков^{1,2}, О.В. Чистов¹

¹ОАО «НПО Геофизика-НВ», 107076, г. Москва, ул. Матросская Тишина, д. 23, стр. 2

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

baliaska@mail.ru

Рассмотрен фотоприемный модуль на основе электронно-оптического преобразователя третьего поколения с фотокатодом на основе нитрида галлия с эффективным отрицательным электронным средством и состыкованной с ним через волоконную оптику цифровой камерой с матрицей приборов с зарядовой связью. Показано соответствие этого фотокатода самым строгим требованиям современной науки и техники. Проведено его сравнение с традиционными щелочными фотокатодами, по результатам которого установлено наличие у фотокатода высокого квантового выхода в солнечно-слепой и видимо-слепой областях спектра ультрафиолетового излучения, низкого темнового тока, однородной чувствительности в широком спектральном диапазоне, резкого спада чувствительности у красной границы и высокой стабильности. Выявлена возможность изменения красной границы чувствительности электронно-оптического преобразователя в широких пределах за счет модификации состава активного слоя фотокатода с помощью добавки алюминия в активный слой Ga \times Al $1-x$ N. Даны рекомендации по использованию фотоприемного модуля в составе приборов наблюдения и мониторинга космического базирования в целях раннего обнаружения очагов пожаров — лесных и на нефтегазовых месторождениях и терминалах для обнаружения и картографирования зон радиоактивного заражения местности, краткосрочного предупреждения землетрясений и извержений вулканов, спектроскопии явлений взаимодействия космических аппаратов с атмосферой и многих других областях хозяйственной деятельности.

Ключевые слова: электронно-оптический преобразователь, ОЭС-фотокатод, фотоприемный модуль, оптико-электронные системы

Ссылка для цитирования: Баясный Л.М., Гордиенко Ю.Н., Грузевич Ю.К., Альков П.С., Чистов О.В. Ультрафиолетовый фотоприемный модуль на основе электронно-оптического преобразователя с фотокатодом GaN/GaAlN на сапфире для применения в оптико-электронных комплексах космического базирования // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2019. Т. 23. № 4. С. 59–65. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-59-65

Ультрафиолетовые (УФ) фотоприемники широко используются в астрономических наблюдениях, спектральных системах наблюдения за состоянием озонового слоя, обнаружения высоковольтных электрических разрядов и пламени различного происхождения, а также в различных областях медицины и биологии. Такие приборы необходимы для применения в военной технике: в мультиспектральных системах обнаружения и наведения ракет, в средствах обеспечения скрытой помехозащищенной УФ-оптической связи, приборах радиационной, химической и биологической разведки [1–4].

Для увеличения чувствительности и помехоустойчивости этих систем активно разрабатываются УФ-фотоприемники различного типа, работающие в так называемых солнечно-слепых т. е. таких, в которых отсутствует солнечное излучение, ($200 \leq \lambda < 290$ нм) и видимо-слепых ($200 \leq \lambda < 390$ нм) диапазонах длин волн, т. е. на уровне моря на Земле и в ближнем космосе соответственно.

Наиболее чувствительными приборами, работающим в указанных областях УФ-спектра

являются электронно-оптические преобразователи (ЭОП) и фотоприемные модули (ФПМ), созданные на их основе.

Чувствительные в УФ-области спектра ЭОП, были разработаны и выпускаются отечественными и зарубежными производителями уже более 30 лет. Фотокатоды этих ЭОП изготавливают на основе таких соединений, как Cs₂Te и Rb₂Te, а также традиционных соединений — K₂CsSb, Na₂KCsSb, Ag-O-Cs и ОЭС-фотокатода на основе GaAs (рис. 1).

Анализ спектральных характеристик показывает, что, хотя фотокатоды, изготовленные на основе традиционных соединений — K₂CsSb, Na₂KCsSb, Ag-O-Cs, обладают высоким квантовым выходом в УФ-области спектра (до 30 %), их использование в приборах затруднено вследствие высокой чувствительности в видимой области, а фотокатоды, изготовленные на основе Cs₂Te и Rb₂Te, имеют неоднородную чувствительность в УФ-диапазоне. Кроме того, эмпирический способ изготовления этих фотокатодов и их поликристаллическая структура позволяют повысить достигнутый уровень чувствительности (24 % на 240 нм).

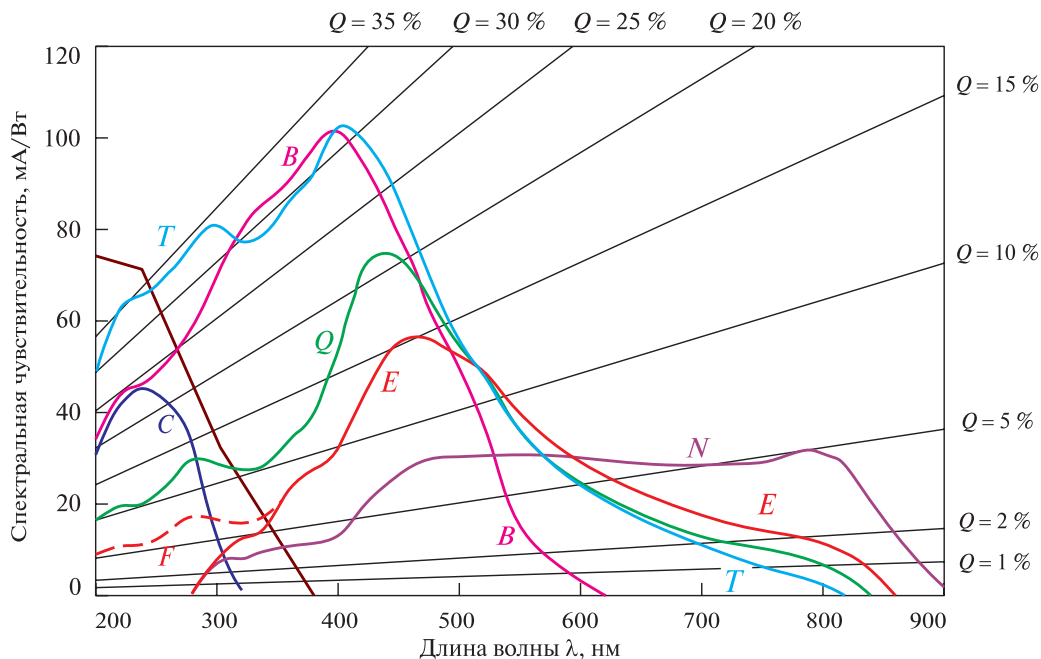


Рис. 1. Спектральные характеристики фотокаатодов, работающих в УФ-диапазоне спектра: *G* — фотокаатод GaN на лейко-сапфире; *C* — фотокаатод CsTe на кварцевом стекле; *B* — бищелочной фотокаатод K_2SbCs на кварцевом стекле; *T* — фотокаатод UV Wide-Band (Na_2KSb)Cs на кварцевом стекле; *Q* — фотокаатод S20 (Na_2KSb)Cs на кварцевом стекле; *F* — фотокаатод S25 (Na_2KSb)Cs на кварцевом стекле; *E* — фотокаатод S25 (Na_2KSb)Cs на боросиликатном стекле; *N* — фотокаатод S25RE (Na_2KSb)Cs на боросиликатном стекле

Fig. 1. Spectral characteristics of photocathodes operating in the UV spectral range: *G* — GaN leucosapphire photocathode; *C* — the CsTe quartz glass photocathode; *B* — K_2SbCs silica glass alkaline photocathode; *T* — UV Wide-Band (Na_2KSb)Cs photocathode on quartz glass; *Q* — the photocathode S20 (Na_2KSb)Cs on quartz glass; *F* — photocathode S25 (Na_2KSb)Cs on quartz glass; *E* — the photocathode S25 (Na_2KSb)Cs on borosilicate glass; *N* — Photocathode S25RE (Na_2KSb)Cs on borosilicate glass

Исторически первый фотокаатод с отрицательным сродством к электрону (ОЭС-фотокаатод) на основе монокристаллического GaAs имеет типичную для таких фотокаатодов П-образную спектральную характеристику с резким спадом чувствительности у красной границы.

Для УФ-области спектра наиболее перспективным материалом является система тройных соединений $Ga_xAl_{1-x}N$, в связи с тем, что они являются монокристаллическими прямозонными полупроводниками с шириной запрещенной зоны от 3,4 до 6,2 эВ, что соответствует спектральному диапазону с красной границей от 200 нм (AlN) до 365 нм (GaN). Меняя состав слоя можно получить предсказуемую форму спектральной характеристики и красную границу фотокаатода в зависимости от решаемой задачи.

Возможность получения ОЭС-фотокаатода на основе нитридов была продемонстрирована еще в середине 1970-х гг., однако активные работы по созданию таких фотокаатодов начались только в конце 1990-х гг. после получения однородных гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) нитрида галлия с высокими электрофизическими параметрами на подложках из сапфира, прозрачного в требуемом спектральном диапазоне, и согласованного с нитридами по коэффициенту термического

расширения (КТР) и постоянной кристаллической решетки, в противном случае высокие параметры слоев нитрида галлия не могут быть получены.

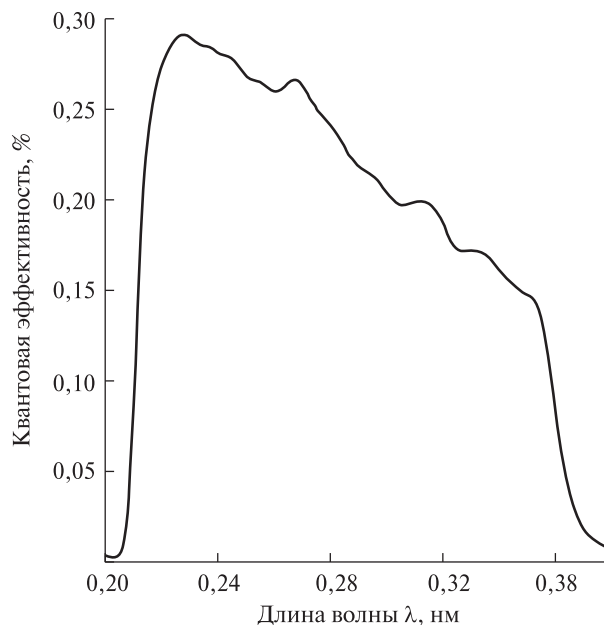


Рис. 2. Спектральная характеристика ОЭС-фотокаатода GaN/GaAlN на лейкосапфире на пропускание

Fig. 2. Spectral characteristic of a GaN/GaAlN OES photocathode on a leucosapphire for transmission

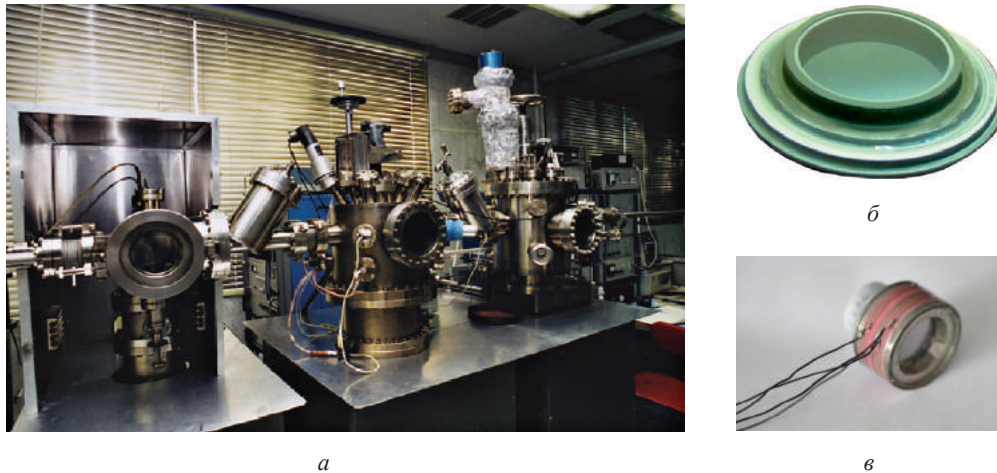


Рис. 3. Сборочная сверхвысоковакуумная установка: *a* — фотокатодный узел GaN/GaAlN; *б* — на сапфире; *в* — вакуумный блок ультрафиолетового электронно-оптического преобразователя
Fig. 3. Assembly ultra-high vacuum installation: *a* — photocathode node GaN/GaAlN; *б* — on sapphire; *в* — the vacuum unit of the ultraviolet electron-optical converter

В настоящее время на фотокатодах GaN был получен квантовый выход до 60 % на отражение и 30 % на 250 нм, 40 % на 240 нм — на пропускание, причем независимо от способа роста эпитаксиальной структуры $c\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/p\text{-GaIn}$ (рост в газовой фазе из металлоорганических соединений или в сверхвысоком вакууме методом молекулярно-лучевой эпитаксии). Спектральная характеристика чувствительности такого фотокатода представлена на рис. 2.

Отечественные производители гетероэпитаксиальных структур в настоящее время достигли высоких электрофизических параметров (значительный уровень и ширина спектральной характеристики фотолюминесценции, совершенство кристаллической решетки активного слоя, высокие значения спектральной зависимости тока в электролит и подвижности неосновных носителей и др.). Первые же опыты по активировке этих структур в сверхвысоковакуумной камере дали квантовый выход 11 % на отражение на длине волны 275 нм [5].

В последние годы активные исследования ОЭС-фотокатодов на основе нитридных ГЭС, изготовленных методом МЛЭ или эпитаксии из МОС в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, ведутся в ИФП СО РАН лабораторией под руководством А.С. Терехова [5, 6].

Цель работы

На основе ГЭС оптимизированной конструкции были разработаны и изготовлены фотокатодные узлы $c\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/p\text{-GaIn}$, сочлененные с титановой оправой с помощью диффузионной сварки, в отличие от фотокатодного узла, изготовленного фирмой Hamamatsu, в котором ГЭС сочленяли сплавлением с профильным сапфировым диском [7].



Рис. 4. Фотоприемный модуль на основе фотокатода GaAlN
Fig. 4. Photodetector module based on the GaAlN photocathode

Результаты и обсуждение

Оптимизированный фотокатодный узел (рис. 3) встроили в стандартную конструкцию ЭОП третьего поколения. Узел, содержал микроканальную пластину и катодолюминесцентный экран, нанесенный на волоконно-оптический элемент, который предназначался для стыковки с прибором с зарядовой связью (ПЗС) или камерой комплементарной структуры металл-оксид-полупроводник (КМОП) в целях дальнейшего изготовления фотоприемного модуля.

В результате проведенных исследований изготовленного ЭОП установлена высокая квантовая эффективность в УФ-спектральном диапазоне, превышающая результаты, достигнутые на традиционных материалах, а также стабильность фотокатода в составе ЭОП при отсутствии ионно-барьерной пленки на микроканальной пластине (МКП), что обеспечивало высокое значение отношения сигнал/шум для основного применения.

Нами изготовлены ФПМ с аналоговым и цифровым выходом на базе ПЗС-матриц как отечественно, так и зарубежного производства [8–10] (рис. 4).

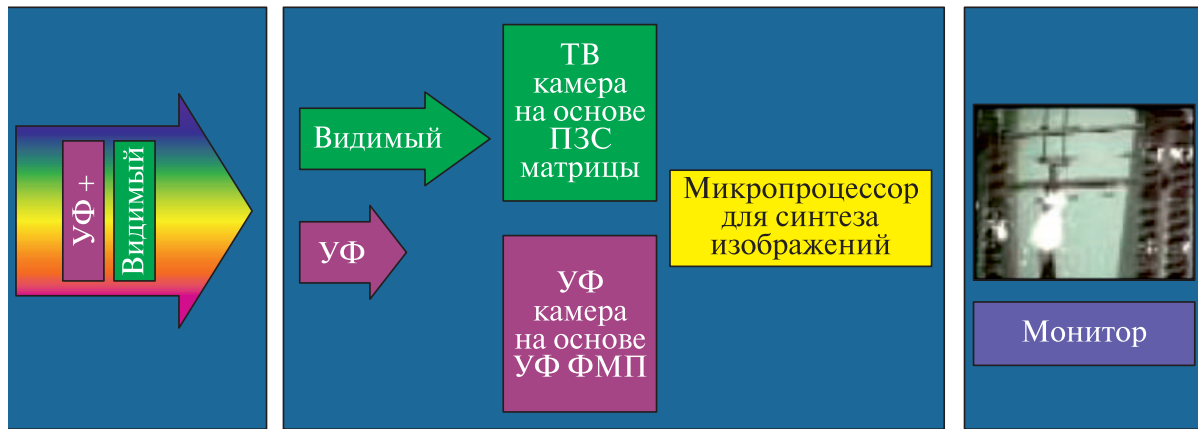


Рис. 5. Комплексование изображений видимого и УФ-диапазона спектров и отображение его на мониторе
Fig. 5. Integration of images of the visible and UV spectral range and its display on the monitor

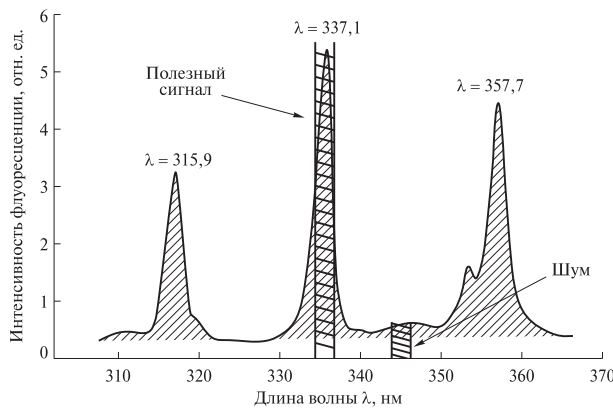


Рис. 6. Спектр свечения атмосферного азота под действием различных источников радиации
Fig. 6. The emission spectrum of atmospheric nitrogen under the influence of various radiation sources

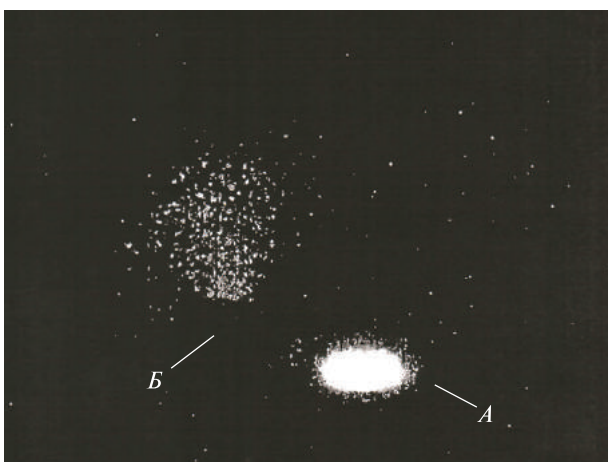


Рис. 7. Изображение источников радиации на экране монитора: А — от источника α-излучения ²³⁸Pu с активностью 100 мКи; В — от источника ⁹⁰Sr γ-излучения с активностью 1,35 мКи
Fig. 7. Image of radiation sources on the monitor screen: А — from a ²³⁸Pu α-radiation source with an activity of 100 mCi; В — from a source of ⁹⁰Sr γ-radiation with an activity of 1,35 mCi

На основе таких ФПМ, работающих в видимом и УФ-диапазоне спектра можно собрать комплексованный двухспектральный прибор для выделения УФ-кластеров в изображении (рис. 5). Это обеспечивает привязку УФ-изображения дефекта в высоковольтном изоляторе (тлеющего разряда) на фоне изображения участка линии электропередачи.

Для мониторинга радиационных загрязнений местности можно использовать эффект свечения атмосферного азота, вызванное его ионизацией радионуклидами (рис. 6, 7).

Выводы

Мониторинг радиационных загрязнений из космоса можно проводить методом, который представлен в работе [10], путем регистрации УФ-излучения флуоресценции атмосферного азота, вызванной радиационным возбуждением от радионуклидов. Принцип мониторинга заключается в сравнении контрастов изображений загрязненных и незагрязненных участков местности при их наблюдении с помощью комплексованной камеры, состоящей из УФ и видимого ПЗС-приемников изображения. Такой же принцип положен в основу мониторинга кратчайших предвестников землетрясений [11].

Свечение ионизированного атмосферного азота в данном случае связано с выделением радиоактивного радона из разломов в земной коре перед началом землетрясений или извержений вулканов [12, 13]. Поскольку из разломов одновременно с радоном выделяется водород, система определяет избыточную концентрацию водорода и изменение концентрации радона двумя разными каналами.

Все методы определения концентрации веществ из космоса позволяют осуществлять координатную привязку к местности известными методами [14].

Список литературы

- [1] Пластинин Ю.А., Карабаджак Г.Ф., Власов В.И., Горшков А.Б., Залогин Г.Н. Измерение и анализ интенсивности УФ излучения атмосферного образования при спуске СА корабля «Союз-ТМА» по наблюдениям с борта МКС // Физико-химическая кинетика в газовой динамике, 2006. Т. 4. С. 270–288.
- [2] Карабаджак Г.Ф., Пластинин Ю.А., Родионов А.В., Сженев Е.Ю., Сипачев Г.Ф., Хмелинин Б.А. Спектрально-зонные исследования сверхслабых эмиссий естественного и техногенного происхождения в верхних слоях атмосферы и ионосферы Земли // Космонавтика и ракетостроение, 2007. Вып. 4 (49). С. 26–32.
- [3] Карабаджак Г.Ф., Комраков Г.П., Кузнецов В.Д., Пластинин Ю.А., Ружин Ю.Я., Фролов В.Л., Хмелинин Б.А. Исследование глобальных пространственно-временных характеристик свечения верхней атмосферы и ионосферы Земли при воздействии на них радиоизлучения при наблюдении с борта МКС // Космонавтика и ракетостроение, 2009. Вып. 4 (57). С. 88–94.
- [4] Бакин В.В., Пахневич А.А., Косолобов С.Н., Шайблер Г.Э., Ярошевич А.С., Терехов А.С. Преломление термализованных электронов, баллистически эмитированных в вакуум из p^+ -GaAs-(Cs,O) // Письма в ЖЭТФ, 2003. Т. 77. № 4. С. 197–201.
- [5] Айнбунд М.Р., Алексеев А.Н., Алымов О.В., Жмерик В.Н., Лапушкина Л.В., Иванов С.В., Пашук А.В., Петров С.И. Солнечно-слепые УФ-фотокатоды на основе гетероструктур AlGaIn с границей спектральной чувствительности 300–330 нм // Письма в ЖТФ, 2012. № 38 (9). С. 88–95.
- [6] Mizuno I., Nihashi a T., Nagai a T., Niigaki b M., Shimizu a Y., Shimano a K., Kato h a K., Ihara a T., Okano K., Matsumoto a M., Tachino a M. Development of UV image intensifier tube with GaN photocathode // Proc. of SPIE, v. 6945, p. 694.
- [7] Мазалов А.В., Сабитов Д.Р., Курешов В.А., Падалица А.А., Мармалюк А.А., Балясный Л.М., Гордиенко Ю.Н., Ильевский Д.В., Чистов О.В., Широков А.А. Гетероструктуры GaN/AlN для фотоэммитеров с отрицательным электронным средством // Успехи прикладной физики, 2013. Т. 1. № 5. С. 617–620.
- [8] Балясный Л.М., Гордиенко Ю.Н., Чистов О.В., Широков Д.А., Варфоломеев А.Ю., Сысоев П.А. Фотоприемный модуль на основе ЭОП с УФ ОЭС фотокатодом // Тезисы докладов конференции «Фотоника-2011», Новосибирск, ИФП СО РАН, 22–26 августа 2011. С. 129. Новосибирск: ИФП СО РАН, 158 с.
- [9] Васильев А.В., Мозжилкин А.В., Садовников Р.Н. Способ обнаружения опасного радиоактивного загрязнения местности. Патент № 2549610. Дата регистрации: 2015.03.31. Номер заявки: 2013154386. Дата подачи заявки: 20131206.
- [10] Бондур В.Г., Давыдов В.Ф., Сорокин И.В., Давыдова С.В., Цидилина М.Н. Устройство регистрации предвестников землетрясений. Патент РФ № 2446418. Патентообладатель ГУ «Научный центр проблем аэрокосмического мониторинга» — ЦПАМ «АЭРОКОСМОС» (RU), ГОУ ВПО МГУЛ. Дата подачи заявки: 14.07.2010 г. Публикация патента: 27.03.2012.
- [11] Кудринская Т.В. Экспериментальные исследования процессов ионизации в атмосферном приземном слое: Автореф. дисс. ... канд. ф.-м. наук, Нальчик, 2003 г.
- [12] Кузнецов В.В. Физика землетрясения и сопутствующих ему явлений в литосфере, атмосфере, ионосфере и магнитосфере, Новосибирск: Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 2010. 24 с.
- [13] Грязнов Н.А., Панталеев С.М., Иванов А.Е., Кочкарев Д.А., Куликов Д.С. Высокопроизводительный метод измерений координат объектов в условиях космического пространства // Математические методы. Моделирование. Экспериментальные исследования, 2013. № 2. С. 197–202.

Сведения об авторах

Балясный Лев Михайлович — гл. конструктор ЭОП и ФПМ ОАО «НПО Геофизика-НВ», baliaska@mail.ru

Гордиенко Юрий Николаевич — канд. техн. наук, заместитель техн. директора ОАО «НПО Геофизика-НВ», zam_techdir@geo-nv.com

Грузевич Юрий Кириллович — канд. техн. наук, заместитель генерального директора по науке ОАО «НПО Геофизика-НВ», yukg@mail.ru

Альков Павел Сергеевич — научный сотрудник ОАО «НПО Геофизика-НВ», pavel_alkov@mail.ru

Чистов Олег Валерьевич — начальник сектора ОАО «НПО Геофизика-НВ», arkhont@mail.ru

Поступила в редакцию 19.04.2019.

Принята к публикации 15.07.2019.

ULTRA-VIOLET PHOTO-RECEIVE MODULE BASED ON IMAGE INTENSIFIER TUBE WITH GAN/GAALN PHOTOCATHODE ON SAPPHIRE FOR USE IN SPACE-BASED OPTICAL-ELECTRONIC SYSTEMS

L.M. Baliasny¹, Yu.N. Gordienko¹, Yu.K. Gruzevich^{1,2}, P.S. Alkov^{1,2}, O.V. Chistov¹

¹Scientific Production Unity «Geophizika-NV», St. Company, bld. 2, 23, Matrosskaya Tishina st., 107076, Moscow, Russia

²BMSTU, 5, 2nd Baumanskaya st., 105005, Moscow, Russia

baliaska@mail.ru

We have developed and manufactured a photo-receive module (FM) based on a 3rd generation image intensifier tube (IIT) with a photocathode based on gallium nitride with an effective negative electron affinity (NEA) and a digital camera with a matrix of charge-coupled devices (CCD) coupled with it through fiber optics. GaN NEA photocathode meets the most stringent requirements of modern science and technology. Compared with traditional alkaline photocathodes, it has a high quantum efficiency in the UV-solar-blind and visible-blind regions of the spectrum, low dark current, uniform sensitivity in a wide spectral range, a sharp drop in sensitivity at the red border and high stability. In addition, by modifying the composition of the active layer of the photocathode with additives of aluminum in the active layer is $Ga_xAl_{1-x}N$, it is possible to change the red border of IIT sensitivity within wide limits. FM as a part of space-based observation and monitoring devices can be used for: early detection of forest fires and fires in oil and gas fields and terminals; detection and mapping areas of radioactive contaminations; short-temporary prevention of earthquakes and volcanic eruptions; spectroscopy of the phenomena of interaction spacecraft with the atmosphere and many other areas

Keywords: image intensifier tube, NEA photocathode, photodetector module, optical-electronic systems

Suggested citation: Baliasny L.M., Gordienko Yu.N., Gruzevich Yu.K., Alkov P.S., Chistov O.V. *Ul'trafioletovyy fotopriemnyy modul' na osnove elektronno-opticheskogo preobrazovatelya s fotokatodom GaN/GaAlN na sapfire dlya primeneniya v optiko-elektronnykh kompleksakh kosmicheskogo bazirovaniya* [Ultra-violet photo-receive module based on image intensifier tube with GaN/GaAlN photocathode on sapphire for use in space-based optical-electronic systems]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 4, pp. 59–65.
DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-59-65

Reference

- [1] Plastinin Yu.A., Karabadzhak G.F., Vlasov V.I., Gorshkov A.B., Zalogin G.N. *Izmerenie i analiz intensivnosti UF izlucheniya atmosfernogo obrazovaniya pri spuske SA korablya «Soyuz-TMA» po nablyudeniya s borta MKS* [Measurement and analysis of the intensity of UV radiation from atmospheric formation during the descent of the Soyuz-TMA spacecraft using observations from the ISS] *Fiziko-khimicheskaya kinetika v gazovoy dinamike* [Physical and Chemical Kinetics in Gas Dynamics], 2006, v. 4, pp. 270–288.
- [2] Karabadzhak G.F., Plastinin Yu.A., Rodionov A.V., Szhenov E.Yu., Sipachev G.F., Khmelinin B.A. *Spektrozonal'nye issledovaniya sverkhslabykh emissiy estestvennogo i tekhnogennogo proiskhozhdeniya v verkhnikh sloyakh atmosfery i ionosfery Zemli* [Spectrozonol studies of super-weak emissions of natural and man-made origin in the upper atmosphere and the ionosphere of the Earth] *Kosmonavtika i raketostroenie* [Astronautics and Rocket Engineering], 2007, iss. 4 (49), pp. 26–32.
- [3] Karabadzhak G.F., Komrakov G.P., Kuznetsov V.D., Plastinin Yu.A., Ruzhin Yu.Ya., Frolov V.L., Khmelinin B.A. *Issledovanie global'nykh prostranstvenno-vremennykh kharakteristik svecheniya verkhney atmosfery i ionosfery Zemli pri vozdeystvii na nikh radioizlucheniya pri nablyudenii s borta MKS* [Investigation of the global space-time characteristics of the upper atmosphere and the Earth's ionosphere when exposed to radio emission when observed from the ISS] *Kosmonavtika i raketostroenie* [Astronautics and Rocket Engineering], 2009, iss. 4 (57), pp. 88–94.
- [4] Bakin V.V., Pakhnevich A.A., Kosolobov S.N., Scheibler G.E., Yaroshevich A.S., Terekhov A.S. *Prelomlenie termalizovannykh elektronov, ballisticheski emitirovannykh v vakuum iz $p + -GaAs-(Cs, O)$* [Refraction of thermalized electrons ballistically emitted into vacuum from $p + -GaAs-(Cs, O)$]. *Letters to the JETP*, 2003, v. 77, no. 4, pp. 197–201.
- [5] Aynbund M.R., Alekseev A.N., Alymov O.V., Zhmerik V.N., Lapushkina L.V., Ivanov S.V., Pashuk A.V., Petrov S.I. *Solnechno-slepye UF-fotokatody na osnove geterostruktur AlGaIn s granitsey spektral'noy chuvstvitel'nosti 300–330 nm* [Sun-blind UV photocathodes based on AlGaIn heterostructures with a spectral sensitivity limit of 300–330 nm] *Pis'ma v ZhTF* [Letters in ZhTF], 2012, no. 38 (9), pp. 88–95.
- [6] Mizuno I., Nishashi T., Nagai T., Niigaki M., Shimizu Y., Shimano K., Katoh K., Ihara T., Okano K., Matsumoto M., Tachino M. Development of UV image intensifier tube with GaN photocathode. *Proc. of SPIE*, v. 6945, p. 694.
- [7] Mazalov A.V., Sabitov D.R., Kureshov V.A., Padalitsa A.A., Marmalyuk A.A., Balyasny L.M., Gordienko Yu.N., Il'evskiy D.V., Chistov O.V., Shirokov A.A. *Geterostruktury GaN/AlN dlya fotoemitterov s otritsatel'nym elektronnym srodstvom* [GaN / AlN heterostructures for photo emitters with negative electron affinity] *Uspekhi prikladnoy fiziki* [Advances in applied physics], 2013, v. 1, no. 5, pp. 617–620.
- [8] Balyasny L.M., Gordienko Yu.N., Chistov O.V., Shirokov D.A., Varfolomeev A.Yu., Sysoev P.A. *Fotopriemnyy modul' na osnove EOP s UF OES fotokatodom* [Photo-receiving module based on image intensifier with UV ECO photocathode] *Tezisy dokladov konferentsii «Fotonika–2011»* [Abstracts of the conference «Photonics–2011»], Novosibirsk, Institute of Applied Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, August 22–26, 2011]. Novosibirsk: Institute of Physics Siberian Branch RAS, pp. 129, 158 p.

- [9] Vasil'ev A.V., Mozzhilkin A.V., Sadovnikov R.N. *Sposob obnaruzheniya opasnogo radioaktivnogo zagryazneniya mestnosti. Patent № 2549610* [The method of detection of dangerous radioactive contamination of the area. Patent number 2549610]. Registration date: 2015.03.31. Application number: 2013154386. Application date: 20131206.
- [10] Bondur V.G., Davydov V.Fedorovich., Sorokin I.V., Davydova S.V., Tsidilina M.N. *Ustroystvo registratsii predvestnikov zemletryaseniya. Patent RF № 2446418*. [Device for recording earthquake precursors. Patent of the Russian Federation No. 2446418]. Patentee GU «Scientific Center for Problems of Aerospace Monitoring» – TsPAM «AEROKOSMOS» (RU), GOU VPO MGUL. Filing date of the application: 07/14/2010. Publication of the patent: 03/27/2012.
- [11] Kudrinskaya T.V., *Eksperimental'nye issledovaniya protsessov ionizatsii v atmosfernom prizemnom sloe: Avtoref. diss. ... kand. fiz.-mat. nauk* [Experimental studies of ionization processes in the atmospheric surface layer: Author's abstract. Diss. ... Cand. Physical and Mathematical Sciences], Nalchik, 2003.
- [12] Kuznetsov V.V. *Fizika zemletryaseniya i sopushtvuyushchikh emu yavleniy v litosfere, atmosfere, ionosfere i magnitosfere* [Physics of the earthquake and related phenomena in the lithosphere, atmosphere, ionosphere and magnetosphere]. Novosibirsk: Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2010, 24 p.
- [13] Gryaznov N.A., Pantaleev S.M., Ivanov A.E., Kochkarev D.A., Kulikov D.S. *Vysokoproizvoditel'nyy metod izmereniy koordinat ob'ektov v usloviyakh kosmicheskogo prostranstva* [High-performance method for measuring the coordinates of objects in space conditions] *Matematicheskie metody. Modelirovanie. Eksperimental'nye issledovaniya* [Mathematical methods. Modeling. Experimental studies], 2013, no. 2, pp. 197–202.

Authors' information

Baliasnyy Lev Michailovich — Chief Constructor IIT of the «Scientific Production Unity Geophizika-NV» Stock Company, baliaska@mail.ru

Gordienko Yuriy Nikolaevich — Cand. Sci. (Tech.), Technical Director of the «Scientific Production Unity Geophizika-NV» Stock Company, zam_techdir@mail.ru

Gruzevich Yuriy Kirillovich — Cand. Sci. (Tech.), Deputy General Director for science of the «Scientific Production Unity Geophizika-NV» Stock Company, yukg@mail.ru

Al'kov Pavel Sergeevich — Researcher of the «Scientific Production Unity Geophizika-NV» Stock Company, pavel_alkov@mail.ru

Chistov Oleg Valer'evich — Chef of department of the «Scientific Production Unity Geophizika-NV» Stock Company, arkhont@mail.ru

Received 19.04.2019.

Accepted for publication 15.07.2019.

АППАРАТНЫЙ СОСТАВ И АЛГОРИТМ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОСЕЙСМОКАРДИОБЛОКА ДЛЯ НЕИНВАЗИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ЗАБОЛЕВАНИЙ ЧЕЛОВЕКА

Ю.К. Грузевич^{1,2}, В.М. Ачильдиев^{1,5}, Н.А. Бедро¹, Ю.Н. Евсеева¹,
М.Н. Комарова¹, Н.С. Коннова², М.А. Басараб², Д.А. Басараб³, В.М. Успенский⁴

¹ОАО «НПО Геофизика-НВ», 107076, г. Москва, ул. Матросская Тишина, д. 23, стр. 2

²МГТУ им. Н. Э. Баумана, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

³Центр сердечно-сосудистой хирургии ГУЗ «Белгородская областная клиническая больница Св. Иоасафа», 308007, г. Белгород, ул. Некрасова, д. 8/9

⁴Филиал Военно-медицинской академии имени С.М. Кирова, 107392, г. Москва, ул. Малая Черкизовская, д. 7

⁵МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

yukg@mail.ru

Разработан электросейсмокардиоблок на базе малошумящего высокоточного трехосевого микромеханического акселерометра и двадцатичетырехразрядного сигма-дельта АЦП для регистрации электро- и сейсмокардиограммы, связанных между собой во времени. Представлена блок-схема и алгоритм работы электросейсмокардиоблока. Проведен анализ научных работ в данной области, который показал, что сейсмокардиография опробована в специализированных областях медицины — космической и спортивной. Исследована зависимость влияния заболеваний сердечно-сосудистой системы на форму волны сейсмокардиосигнала. Рассмотрены основные методы цифровой обработки сигналов, а также возможности применения данных электросейсмокардиографии для диагностики состояния сердечно-сосудистой системы. По результатам работы сделан вывод о возможности использования сейсмокардиографии при диагностике сердечно-сосудистой системы как отдельного метода диагностики, так и в дополнение к стандартизованным методам электрокардиографии.

Ключевые слова: электрокардиография, сейсмокардиография, фазовый портрет, МЭМС-датчики

Ссылка для цитирования: Грузевич Ю.К., Ачильдиев В.М., Бедро Н.А., Евсеева Ю.Н., Комарова М.Н., Коннова Н.С., Басараб М.А., Басараб Д.А., Успенский В.М. Аппаратный состав и алгоритм работы электросейсмокардиоблока для неинвазивной диагностики заболеваний человека // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2019. Т. 23. № 4. С. 66–75. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-66-75

Терминология сейсмокардиографии происходит от технологии, используемой в сейсмологии, где исследователи изучают вибрации при землетрясении и распространении упругих волн. Первую заявку подал немецкий геофизик Г. Ангенхейстер в 1920-х гг. Он обнаружил сердечные сигналы от вибрации тела при размещении прибора для регистрации землетрясений на столе.

В начале 1960-х гг. российские исследователи впервые использовали термин «сейсмокардиограмма». Две группы, возглавляемые Р.М. Баевским и Б.С. Боженко, позаимствовали технологию из сейсмологии и измерили ускорение от сердечных сокращений [1, 2].

Группа Боженко записала сигнал, прикрепив акселерометр на грудную стенку, лежавший в диапазоне частот 4...40 Гц. В отличие от высокоточных современных МЭМС-акселерометров, используемый Боженко акселерометр был генератором с магнитной пружиной, который генерирует ток от индукционных катушек в соответствии с обнаруженным им ускорением. Боженко удалось записать одновременно электрокардиограмму (ЭКГ) и сейсмокардиограмму (СКГ) и проанализировать интервалы между ними. Систолический и диастолический компоненты от СКГ были интерпретированы, и их связь с волнами ЭКГ была также проанализирована.

Группа Баевского измеряла вибрацию, вызванную сердцебиением, так же, как сейсмолог определяет подземную вибрацию, вызванную землетрясением. Несмотря на то, что они использовали иной метод, качество их записи было таким же высоким, как и у группы Боженко — сердечные циклы были четко выделены один относительно другого.

Задача российских исследователей состояла в том, чтобы применить эту технологию в качестве метода мониторинга здоровья в аэрокосмической программе. После первого эксперимента по микрогравитации на собаке на третьем советском спутнике в 1960-х гг., на ракетах «Восток-5» и «Восток-6» были зарегистрированы первые СКГ у космонавтов, что составляло часть космических задач на начало 1970-х гг. До сих пор СКГ все еще используется, в частности на Международной космической станции (МКС), как часть космических экспериментов (с 2007 г.) [3].

По сравнению с внедрением СКГ в аэрокосмическую область ее применение в клинических и коммерческих целях идет относительно медленно. Первые СКГ в медицинских целях применили Д. Салерно и Дж. Занетти в 1991 г., а затем коммерциализировала компания SeisMed Instruments. Инструмент, переоборудованный из сейсмологического исследовательского

оборудования, был прикреплен к груди пациентов в дорсо-вентральном направлении. Эта экспериментальная установка рассматривалась как одна из стандартных установок в будущем.

В период с 1991 по 1994 гг. проводились различные эксперименты с использованием этой методики измерения СКГ и других технологий мониторинга сердца [4, 5]. Как показали эксперименты, СКГ обладает более высокой чувствительностью и дает возможность получить более детальные данные по сравнению с ЭКГ, особенно при выявлении ишемической болезни сердца. При одновременных эхокардиографии и СКГ была проанализирована терминология многих видов сердечной деятельности [2].

Дальнейшие исследования показали, что комбинацию ЭКГ и СКГ можно сопоставить с ультразвуковой доплеровской визуализацией [6]. Кроме того, было доказано, что СКГ совместима с магнитным полем, что обеспечивает возможность его использования в качестве мониторинга сердечной деятельности во время магниторезонансной терапии (МРТ) [7].

Цель работы

Рассмотрены основные методы цифровой обработки сигналов, а также возможности применения данных электросейсмокардиографии для диагностики состояния сердечно-сосудистой системы.

Состав и алгоритм работы электросейсмокардиоблока

Благодаря стремительному развитию микроэлектроники и электроники в последние десятилетия стало возможным изготовление малогабаритного сейсмокардиоблока (СКБ). На печатной плате диаметром 35 мм удалось разместить трехосевой микромеханический акселерометр, микромеханический гироскоп, микроконтроллер и вторичную электронику для осуществления питания и взаимодействия с СКБ. Измерение одной сейсмокардиограммы бессмысленно без регистрации ЭКГ в силу разности физиологических процессов, которые они характеризуют. ЭКГ показывает электрофизическую деятельность сердечной мышцы, в то время как СКГ отображает механические колебания грудной стенки, связанные с деятельностью сердечной мышцы (рис. 1).

Ключевым элементом ЭСКБ является 24-рядный сигма-дельта аналого-цифровой преобразователь (АЦП), позволяющий измерять амплитуду дифференциального сигнала с разрешением 0,2 мкВ при уровне входного шума 4 мкВ и частотой дискретизации до 32 kSPS. Используемое АЦП специально предназначено для измерения ЭКГ, имеет восемь входных каналов, позволяющих реализовать схемы измерения по Франку,

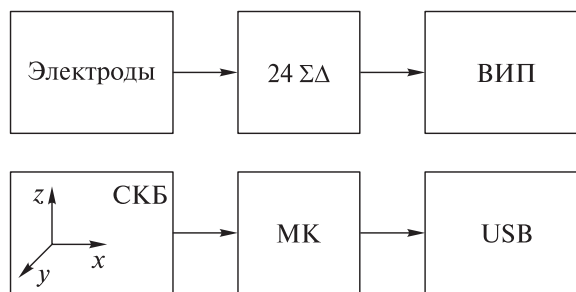


Рис. 1. Блок-схема электросейсмокардиоблока: СКБ — сейсмокардиоблок; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; МК — микроконтроллер; ВИП — вторичный источник питания; USB — universal serial bus

Fig. 1. Block diagram of the electro-seismic cardioblock: СКБ — seismic cardioblock; АЦП — analog-to-digital converter; МК — microcontroller; ВИП — a secondary power source; USB — universal serial bus

Эйтховену, Небу. В ЭСКБ используется классический метод измерения ЭКГ по Эйтховену — с использованием четырех электродов, позволяющих сформировать три классических отведения ЭКГ (I, II, III). Другим преимуществом данного АЦП является встроенная функция фильтрации данных. В АЦП также есть фильтр низких частот, настраиваемый в зависимости от скорости информационного обмена, и фильтр синфазной помехи входного сигнала, в котором подавление синфазной помехи осуществляется на уровне 100 дБ. Оцифрованные данные с АЦП поступают на микроконтроллер, который компонует результаты измерения ЭКГ и СКГ. Сейсмокардиоблок имеет собственный микроконтроллер, осуществляющий первичную обработку данных, полученных с трехосевого микромеханического акселерометра фирмы Kionix марки KXR94-2050. Микромеханический акселерометр обладает малым уровнем внутренних шумов (не более $45 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$) и малой погрешностью измерения — 0,1 %. Вторым ключевым элементом СКБ является микромеханический гироскоп L3GD20H, используемый для компенсации углового перемещения СКБ.

Сейсмокардиоблок может выступать в роли отдельного прибора, в нем имеется собственный микроконтроллер со встроенным программным математическим блоком обработки информации. Это позволяет снизить вычислительную нагрузку с микроконтроллера ЭСКБ и использовать более гибкую обработку ЭКГ и СКГ (рис. 2), имеющих разную полосу пропускания. В частности, полоса пропускания ЭКГ лежит в пределах 0...300 Гц [8], СКГ — не превышает 100 Гц. При измерении ЭКГ регистрируются не только биоэлектрические сигналы, но и наведенные наводки. Человек выступает в качестве антенны, на которую наводятся помехи бытовой электросети 50...60 Гц. Они могут достигать десятичных значений милливольт, что при сигнале ЭКГ в 1 мВ критично. Для этого

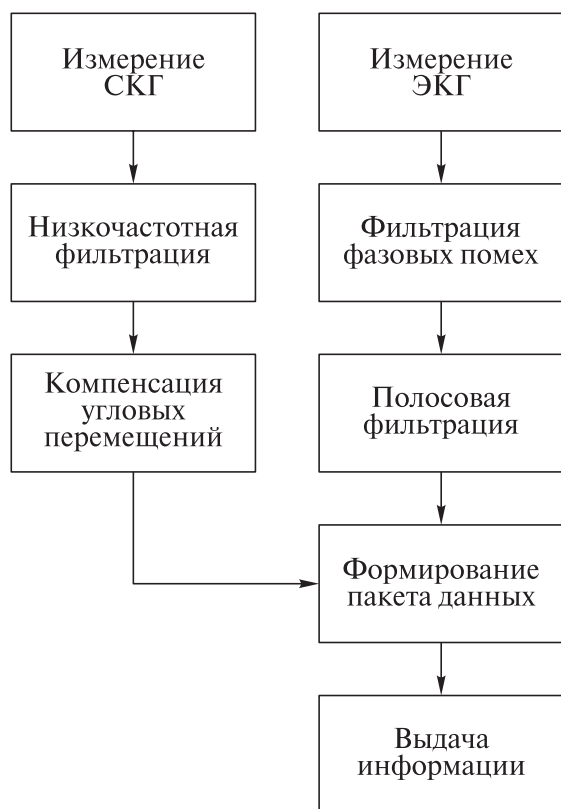


Рис. 2. Блок-схема работы электросейсмокардиоблока
Fig. 2. The block diagram of the electro-seismic cardiac block operation

в ЭСКБ используется фильтр синфазной помехи, который позволяет уменьшить уровень шума на 100 дБ. Помимо синфазного фильтра в обработке ЭКГ используют полосовой фильтр с полосой пропускания 0,05...300 Гц для удаления тренда, вызванного изменением сопротивления контакта электрод — человек, а также шумов выше полосы пропускания. Сейсмокардиоблок менее подвержен влиянию синфазной помехи, так как наводки на внутренние цепи компенсируются конструкторскими решениями, а синфазная помеха по цепи питания подавляется использованием стабилизаторов напряжения повышенной точности. Помимо механических колебаний грудной стенки, микромеханический акселерометр измеряет проекцию ускорения свободного падения на оси чувствительности. В целях исключения влияния ускорения свободного падения, а также пространственного перемещения человека используется микромеханический гироскоп для вычисления угловых скоростей и компенсации угловых перемещений с использованием матрицы поворота. Микроконтроллер ЭСКБ проводит обработку ЭКГ, а также осуществляет управление СКБ. Помимо формирования пакета данных, содержащих как СКГ, так и ЭКГ, необходимо синхронизировать данные между собой. Электросейсмокардиоблок выдает данные ЭКГ по трем отведениям, СКГ — по трем осям.

Методы неинвазивной диагностики на основе данных ЭКГ и СКГ

Одним из самых наиболее значимых наследий в области сейсмокардиографии и электрокардиографии на сегодняшний день является стандартная интерпретация и номенклатура сегмента графиков СКГ и ЭКГ в зависимости от различных событий в течение сердечного цикла [9, 10] (рис. 3).

Зубцы ЭКГ — это участки, лежащие выше изолинии: *P* — сокращение и расслабление предсердий; *Q*, *S* — возбуждение межжелудочковой перегородки; *R* — возбуждение желудочков; *T* — расслабление желудочков.

Интервалы ЭКГ — это участки, лежащие на изолинии: *PQ* — время распространения импульса от предсердий до желудочков.

Сегменты ЭКГ — это участки, включающие в себя интервал и зубец: *QRST* — длительность сокращения желудочков; *ST* — время полного возбуждения желудочков; *TP* — время электрической диастолы сердца.

Зубцы СКГ — это следующие участки: *AS* — систола (сокращение) предсердия; *MC* — закрытие митрального клапана; *IM* — изоволюмическое сокращение желудочков: все клапаны закрыты, кровь не движется; *AO* — открытие аортального клапана; *IC* — изотоническое сокращение; *RE* — пик быстрого выброса; *AC* — закрытие аортального клапана; *MO* — открытие митрального клапана; *RF* — быстрое заполнение.

За работу сердечной мышцы отвечает синоатриальный узел (САУ), называемый синусовым узлом (водитель первого порядка), который является нормальным естественным водителем ритма сердца и отвечает за запуск сердечного цикла (сердцебиение). Он спонтанно генерирует электрический импульс, который после прохождения по всему сердцу заставляет его сокращаться. Хотя электрические импульсы генерируются спонтанно, скорость поступления импульсов и, следовательно, частота сердечных сокращений находятся под контролем нервной системы. Таким образом, САУ генерирует электрический импульс, который, проходя по предсердиям, вызывает их сокращение (см. рис. 3, б), что характеризует Р-волна ЭКГ.

Сокращение предсердий приводит к «дозаполнению» желудочков, сопровождается механическими колебаниями, которые регистрируются на грудной клетке как *AS*-пик СКГ. За время прохождения электрического импульса от предсердий к желудочкам (интервал *P-Q*) происходит расслабление мышц предсердия, закрываются митральный *MC* и трехстворчатый клапаны — так называемое изоволюмическое сокращение *IM* (см. рис. 3, б) когда все клапаны закрыты и кровь не движется.

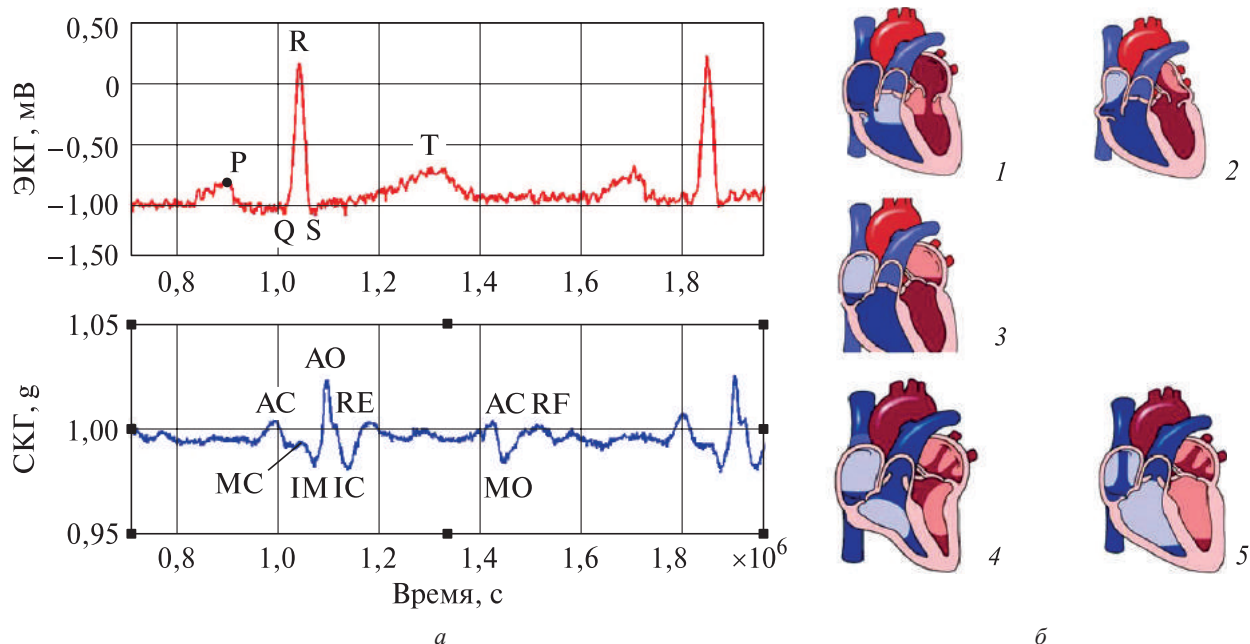


Рис. 3. Электро- и сейсмокардиограмма (а) с иллюстрацией работы сердечной мышцы (б): 1 — диастола: наполнение желудочков; 2 — пресистола: сокращение предсердий; 3 — систола: изовольюмическое сокращение, все клапаны закрыты, кровь не движется; 4 — систола: изгнание крови из желудочков, полулунные клапаны открыты; 5 — полулунные клапаны закрыты

Fig. 3. Electro-and seismocardiogram (a) with an illustration of the heart muscle (b): 1 — diastole: filling the ventricles; 2 — presystole: atrial contraction; 3 — systole: isovolumic contraction, all valves are closed, blood does not move; 4 — systole: expulsion of blood from the ventricles, lunar valves open; 5 — semilunar valves are closed

Электрический импульс, проходя через ножки пучка Гиса, приводит к возбуждению межжелудочковой перегородки (*Q*-волна ЭКГ), что приводит к сокращению левого и правого желудочка (*R*-пик), происходит систолический процесс изгнания крови из желудочков, открываются полулунные клапаны (аорты) *АО* (см. рис. 3, б), кровь начинает поступать в аорты, под действием электрического импульса продолжается изотоническое сокращение предсердий (*IC*), что приводит к быстрому выбросу крови (*RE*). Далее происходит расслабление желудочков (*TP*-сегмент ЭКГ) и закрытие полулунных клапанов (аортального клапана *AC*). Открываются митральный и трехстворчатый клапаны (*МО*), начинается заполнение предсердий кровью, сопровождаемое быстрым заполнением *RF* (см. рис. 3, б). Таким образом, ЭКГ визуализирует прохождение электрического импульса по сердечной мышце, отражая ее функциональные особенности, а СКГ отображает динамические характеристики сердца.

Современная диагностика по ЭКГ заключается в расшифровке полученных данных специалистом, обладающим достаточными знаниями в данной области. Расшифровка заключается в сравнении измеренных показателей ЭКГ: *P*, *T*-зубца, *QRS*, *ST*-комплексов с шаблонами, характерными для заболеваний сердечно-сосудистой системы. С помощью проведения элек-

трокардиографии можно обнаружить следующие отклонения:

- нарушения сердечного ритма: тахикардию, аритмию, мерцательную аритмию, брадикардию и пр.;
- проявления ишемической болезни сердца;
- сердечные блокады: нарушения электрической проводимости сердца.

Некоторые нарушения со стороны сердечной системы могут оставаться незамеченными, если они не проявились в момент обследования. В таких случаях больному назначают суточное мониторирование.

Вследствие того, что масса левого желудочка в норме значительно больше массы правого желудочка, электрические процессы, происходящие в левом желудочке, суммарно сильнее, и электрическая ось сердца будет иметь некоторое угловое смещение. Направление электрической оси сердца показывает суммарную величину биоэлектрических изменений, протекающих в сердечной мышце при каждом ее сокращении, и отражает электрические процессы, происходящие в сердце. Таким образом, заболевания сердечной мышцы оказывают влияние на направление оси, что приводит к необходимости включения данного параметра в контрольную группу. В зависимости от индивидуальных анатомических особенностей положение электрической оси сердца у здоровых людей может колебаться от 0 до 90° [11, 12].

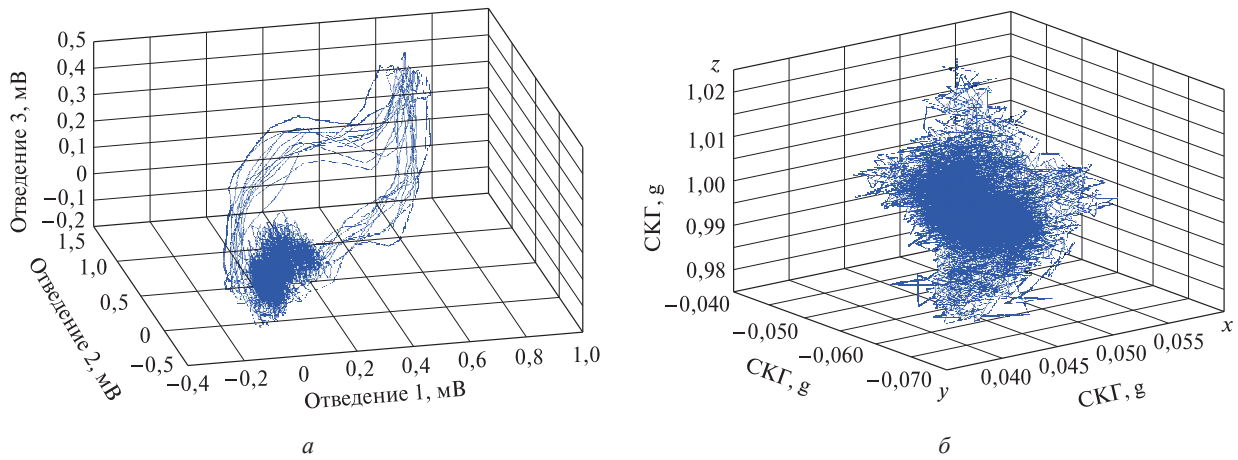


Рис. 4. Фазовые портреты ЭКГ (а) и СКГ (б)
 Fig. 4. Phase portraits of EKG (a) and SKG (b)

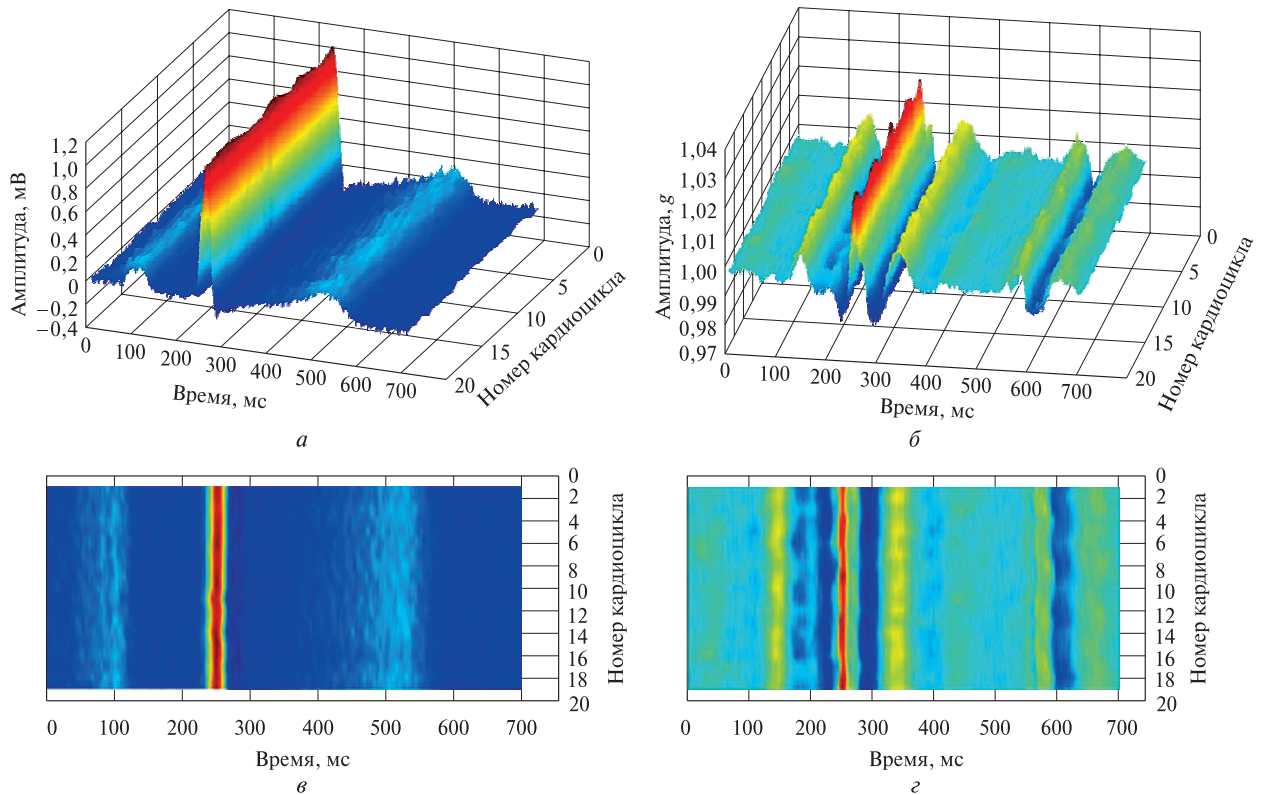


Рис. 5. Амплитудно-временные графики изменения ЭКГ (а, в) и СКГ (б, з) для нескольких кардиоциклов в трехмерном пространстве
 Fig. 5. Amplitude-time graphs of changes in EKG (a, в) and SKG (б, з) for several cardiocycles in three-dimensional space

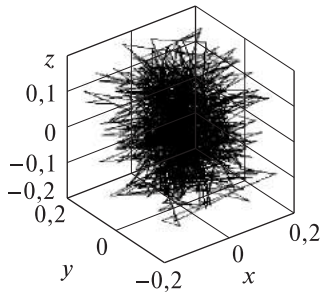
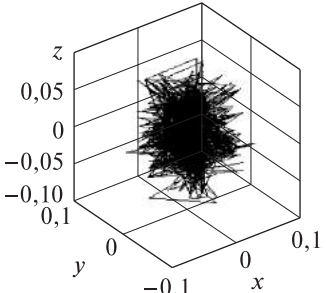
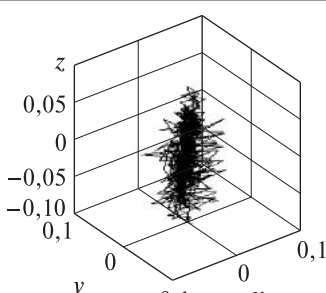
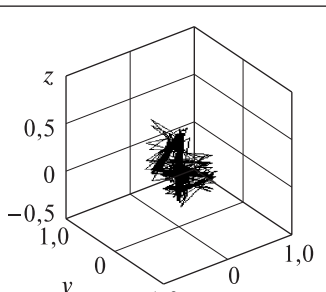
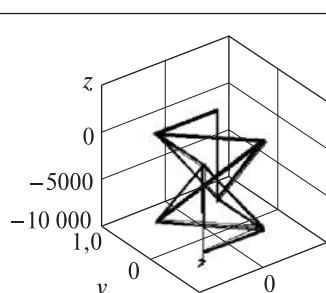
В настоящее время нет утвержденных эталонов СКГ, где приводились бы показатели и характеристики, соответствующие заболеваниям сердечно-сосудистой системы. В большинстве работ, посвященных данной области, рассматривается возможность измерения СКГ с применением различных микромеханических акселерометров и вибродатчиков, а также изучение вариабельности СКГ [13–16].

Помимо разработки экспериментального образца ЭСКБ перед нами стояла задача нахождения метода диагностики заболеваний, альтернативно-

го традиционной диагностике по ЭКГ. Поскольку расшифровку ЭКГ может проводить только узкий круг специалистов, увеличивается время от процедуры измерения до выявления патологии. Необходимо разработка первичного диагностического метода, позволяющего сразу же после измерения получать заключение о работе сердечно-сосудистой системы и при необходимости направлять на последующую диагностику или расшифровку данных. В этих целях для обработки данных СКГ применили метод построения фазовых портретов,

Классификация «динамических» фазовых портретов ЭКГ [18]

Classification of «dynamic» EKG phase patterns [18]

Название	Вид фазового портрета	Летальность,%	Характеристика ритма
Большой однородный «клубок»		–	Однородность, изотропность наполнения. Ритм в норме
Малый однородный «клубок»		–	Однородность, изотропность наполнения. «Жесткий» ритм
«Веретено»		1,02	Однородность, неизотропность. Мерцательная аритмия
«Крест»		56,34	Выход за пределы устойчивости. Потеря аттрактора. Фибрилляции, re-entry
Простые геометрические фигуры		95,80	Необратимый процесс. Кома. Несколько часов до смерти

на основе фазовых портретов ЭКГ [17] для определения электрической оси сердечной мышцы, когда в трехмерном пространстве строится график зависимости между I, II и III отведениями (рис. 4). Как видно из рис. 4, фазовый портрет СКГ имеет форму овального клубка, в то время как фазовый портрет ЭКГ-сигнала отображает четкую цикличность сердечного ритма.

На первый взгляд, по фазовому портрету СКГ нельзя в дальнейшем получить какую-либо информацию, однако известны работы [18], когда сигнал ЭКГ рассматривается как сигнал динамической системы и фазовый портрет строится лишь по одному отведению. В качестве динамических переменных были выбраны величина RR -интервала и скорость ее изменения. При формировании третьей оси фазового пространства (3D-3 dimension) выбирается величина RR -интервала со сдвигом на один интервал или на величину n , соответствующую четверти периода низкочастотной составляющей АКФ (первое пересечение номерной оси). В таблице приведены формы фазовых портретов и статистика летальности.

Как видно из таблицы, фазовый портрет СКГ, приведенный на рис. 4, б, соответствует фазовому портрету «Большой однородный клубок». При наборе статистических данных с группировкой их по заболеваниям и физиологическим особенностям, возможна качественная оценка диагностики заболеваний на основе фазовых портретов СКГ.

Также известна методика диагностики заболеваний на основе вариабельности амплитуды и интервалов R-пика ЭКГ [19] вследствие его наибольшего энергетического вклада. На основе данной методики диагностируется до 40 наиболее распространенных и опасных заболеваний внутренних органов. На рис. 5 приведены трехмерные графики ЭКГ и СКГ: по вертикальной оси отображается амплитуда сигнала, а по горизонтальной — время и следующий кардиоцикл. Такое отображение наглядно демонстрирует вариабельность пиков ЭКГ и СКГ. Сейсмокардиограмма имеет более сложную форму, поэтому вариабельность амплитуды и интервалов может проводиться по пикам AS , IM , AO и IC .

Выводы и рекомендации

Получены новые результаты в области обработки данных и проектирования ЭСКБ в качестве диагностической аппаратуры медицинского назначения, основными из которых являются следующие:

- разработан алгоритм работы ЭСКБ;
- разработан ЭСКБ, позволяющий проводить измерение параметров ЭКГ и СКГ с повышенной точностью;

– представлена возможность диагностики заболеваний на основе фазовых портретов и вариабельности пиков СКГ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-02019.

Список литературы

- [1] Боженко Б.С. Сейсмокардиография — новый метод в исследовании функциональных состояний сердца // Терапевтический архив, 1961. № 33. С. 55–64.
- [2] Баевский Р.М., Егоров А.Д., Казарян Л.Н. Методика сейсмокардиографии // Кардиология, 1964. № 2. С. 87–89.
- [3] Migeotte P.F., De Ridder S., Tank J., Pattyn N. Three dimensional ballisto- and seismo-cardiography: HIJ wave amplitudes are poorly correlated to maximal systolic force vector // Conference proceedings: ... Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Conference 2012, 28 August–01 September 2012, pp. 5046–5049. DOI: 10.1109/EMBC.2012.6347127
- [4] Crow R., Hannan P., Jacobs D., Hedquist L., Salerno D. Relationship between seismocardiogram and echocardiogram for events in the cardiac cycle // American journal of Noninvasive Cardiology, 1994, v. 8, pp. 39–46.
- [5] Salerno D.M., Zanetti J.M., Green L. Seismocardiographic changes associated with obstruction of coronary blood flow during balloon angioplasty // The American journal of cardiology, 1991, v. 68, no. 2, pp. 201–207.
- [6] Wilson R., Bamrah V., Lindsay J. Diagnostic accuracy of seismocardiography compared with electrocardiography for the anatomic and physiologic diagnosis of coronary artery disease during exercise // The American journal of cardiology, 1993, v. 71, no. 7, pp. 536–545.
- [7] Dinp A. Design of a Seismocardiography Using Tri-Axial Accelerometer Embedded with Electrocardiogram // Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, WCECS 2011, October 19–21, 2011, San Francisco, USA, 2011, v. II.
- [8] Зайченко К.В., Жаринов О.О., Кулин А.Н., Кульгина, Орлов А.П. Съём и обработка биоэлектрических сигналов. Санкт-Петербург: СПбГУАП, 2001, 140 с.
- [9] Расшифровка ЭКГ у взрослых и детей, нормы в таблицах и другая полезная информация. URL: <http://oserdce.com/diagnostika/ekg/rasshifrovka.html> (дата обращения 15.11.2018).
- [10] Paukkunen M. Seismocardiography: Practical implementation and feasibility // Aalto University publication series Doctoral Dissertations, 2014, no. 145, 46 p.
- [11] Электрическая ось сердца (ЭОС): суть, норма положения и нарушения. URL: <http://sosudinfo.ru/serdce/eos-elektricheskaya-os-serdca> (дата обращения 23.03.2016)
- [12] Man S., Maan A. C., Schaliij M.J., Swenne C.A. Vectorcardiographi diagnostic & prognostic information derived from 12 lead electrocardiogram // J. Electrocardiol, 2015, no. 48, pp. 463–475.
- [13] Gurev V., Tavakolian K., Constantino J., Kaminska B., Blaber A.P. Mechanisms underlying isovolumic contraction and ejection peaks in seismocardiogram morphology // J. of medical and biological engineering, 2012, no. 32 (2), p. 103.
- [14] Paukkunen M.J.T., Linnavuo M.T., Sepponen R.E. A Portable Measurement System for the Superior-Inferior Axis of the Seismocardiogram // J. of Bioengineering & Biomedical Science, 2013, no. 3, pp. 123. DOI: 10.4172/2155-9538.1000123

- [15] García-González M.A., Argelagós-Palau A., Fernández-Chimeno M., Ramos-Castro J. Differences in QRS Locations due to ECG Lead: Relationship with Breathing // XIII Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing 2013, IFMBE Proceedings, 2014, v. 41, pp. 962–964. DOI: 10.1007/978-3-319-00846-2_238
- [16] Kouhyar Tavakolian Characterization and analysis of seismocardiogram for estimation of hemodynamic parameters // Diss. ... Dr. of Philosophy. Simon Fraser University, 2010, 217 p.
- [17] Файнзильберг Л.С. Компьютерная электрокардиография до и после академика Н.М. Амосова // Управляющие машины и системы, 2013. № 3. С. 3–13.
- [18] Кузнецов А.А. Биофизика сердца. Методы обработки и анализа электрокардиографической информации при донологических исследованиях. Владимир: ВлГУ, 2012. 23 с.
- [19] Успенский В.М. Информационная функция сердца. Теория и практика диагностики заболеваний внутренних органов методом информационного анализа электрокардиосигналов / под ред. В.Б. Симоненко. М.: Планета, 2016. 272 с.

Сведения об авторах

Грузевич Юрий Кириллович — канд. техн. наук, зам. ген. директора по науке ОАО «НПО Геофизика-НВ», yukg@mail.ru

Ачильдиев Владимир Михайлович — канд. техн. наук, гл. конструктор МНЭМС, ОАО «НПО Геофизика-НВ», glmnems@geo-nv.com

Бедро Николай Анатольевич — зам. гл. конструктора МНЭМС начальник отдела, ОАО «НПО Геофизика-НВ», job_nick@mail.ru

Евсеева Юлия Николаевна — инженер I кат., ОАО «НПО Геофизика-НВ», sun51188@gmail.com

Комарова Мария Николаевна — вед. инженер ОАО «НПО Геофизика-НВ», maria-komarova86@mail.ru

Коннова Наталья Сергеевна — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана, nkonnova@bmsu.ru

Басараб Михаил Алексеевич — д-р физ.-мат. наук, зав. кафедрой «Информационная безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана, bmic@mail.ru

Басараб Дмитрий Алексеевич — канд. мед. наук, вед. хирург ГУЗ «Белгородская областная клиническая больница Св. Иоасафа», basarab.74@yandex.ru

Успенский Вячеслав Максимилианович — д-р мед. наук, профессор филиала Военно-медицинской академии имени С.М. Кирова (г. Москва), действующий член РАКС им. Циолковского, medddik@mm.st

Поступила в редакцию 19.04.2019.

Принята к публикации 15.07.2019.

HARDWARE AND SOFTWARE OF ELECTROSEISMOCARDIOBLOCK FOR NONINVASIVE DIAGNOSTICS OF HUMAN DISEASES

Y.K. Gruzevich^{1,2}, V.M. Achildiev^{1,5}, N.A. Bedro¹, Y.N. Evseeva¹, M.N. Komarova¹, N.S. Konnova², M.A. Basarab², D.A. Basarab³, V.M. Uspenskiy⁴

¹Scientific Production Unity «Geophizika-NV», St. Company, 23, p. 2, Matrosskaya Tishina st., Moscow, Russia

²BMSTU, 5, 2nd Baumanskaya st., 105005, Moscow, Russia

³Cardiovascular-surgery centre of the Belgorod Regional Clinical hospital, 8/9, Nekrasov st., 308007, Belgorod, Russia

⁴Branch of the Kirov Military-medical Academy, 7, Malaya Cherkizovskaya st., 107392, Moscow, Russia

⁵BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

yukg@mail.ru

Electroseismocardioblock was developed on the base of noiseless precision three-axial micromechanical accelerometer and twenty four digit sigma-delta analog-to-digital converter (ADC) for registration electro- and seismocardiograms, connected among themselves in time. The diagram and software of the electroseismocardioblock is represented. Analyzing of the scientific researches in the given area has shown, that today the first seismocardiographic is tested in the specialized medicine areas of, such as space researches and sports medicine. But due to, that today there was a big jump in micromechanics development and cheap MEMS sensors with a low level of noise have appeared in the market and there was possible a manufacture of inexpensive devices for diagnostic application. Researches with participation of experts of the Belgorod regional clinical hospital are carried out for determination of influence dependence of the cardiovascular diseases on the form of the seismocardiographic wave. In this research work the basic methods of the digital processing of signals are considered and also opportunities of application of the electroseismocardiographic data for diagnostics of the condition of cardiovascular system are considered. The received research results have shown, that the form of the seismocardiographic wave for each person is individual and cardiovascular diseases affected on the wave form. Research results illustrate the opportunity of seismocardiographic usage for cardiovascular system diagnostics as a separate diagnostics method and as addition to standardized cardiographic methods.

Keywords: electrocardiography, seismic cardiography, phase portrait, MEMS sensors

Suggested citation: Gruzevich Y.K., Achildiev V.M., Bedro N.A., Evseeva Y.N., Komarova M.N., Konnova N.S., Basarab M.A., Basarab D.A., Uspenskiy V.M. *Apparatnyy sostav i algoritm raboty elektroseymsokardiobloka dlya neinvazivnoy diagnostiki zabolevaniy cheloveka* [Hardware and software of electroseismocardioblock for noninvasive diagnostics of human diseases]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 4, pp. 66–75. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-66-75

References

- [1] Bozhenko B.S. *Seysmokardiografiya – novyy metod v issledovanii funktsional'nykh sostoyaniy serdtsa* [Seismocardiography — a new method in the study of functional conditions of the heart] *Terapevticheskiy arkhiv*, 1961, vol. 33, pp. 55–64.
- [2] Baevskii R.M., Egorov A.D., Kazarian L.A. *Metody seysmokardiografii* [The method of seismocardiography], *Kardiologiya*, 1964, v. 18, pp. 87–89.
- [3] Migeotte P.F., De Ridder S., Tank J., Pattyn N. Three dimensional ballisto- and seismo-cardiography: HIJ wave amplitudes are poorly correlated to maximal systolic force vector. Conference proceedings: ... Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Conference 2012, 28 August–01 September 2012, pp. 5046–5049. DOI: 10.1109/EMBC.2012.6347127
- [4] Crow R., Hannan P., Jacobs D., Hedquist L., Salerno D. Relationship between seismocardiogram and echocardiogram for events in the cardiac cycle. *American journal of Noninvasive Cardiology*, 1994, v. 8, pp. 39–46.
- [5] Salerno D.M., Zanetti J.M., Green L. Seismocardiographic changes associated with obstruction of coronary blood flow during balloon angioplasty. *The American journal of cardiology*, 1991, v. 68, no. 2, pp. 201–207.
- [6] Wilson R., Bamrah V., Lindsay J. Diagnostic accuracy of seismocardiography compared with electrocardiography for the anatomic and physiologic diagnosis of coronary artery disease during exercise. *The American journal of cardiology*, 1993, v. 71, no. 7, pp. 536–545.
- [7] Dinp A. Design of a Seismocardiography Using Tri-Axial Accelerometer Embedded with Electrocardiogram. Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, WCECS 2011, October 19–21, 2011, San Francisco, USA, 2011, v. II.
- [8] Zaychenko K.V., Zharinov O.O., Kulin A.N., Kulygina L.A., Orlov A.P. *S'yem i obrabotka bioelektricheskikh signalov* [Removal and processing of bioelectric signals]. SUAI, 2001, 140 p.
- [9] *Rasshifrovka EKG u vzroslykh i detey, normy v tablitsakh i drugaya poleznaya informatsiya* [ECG decoding in adults and children, norms in the tables and other useful information]. URL: <http://oserdce.com/diagnostika/ekg/rasshifrovka.html> (accessed 15.11.18).
- [10] Paukkunen M. Seismocardiography: Practical implementation and feasibility. Aalto University publication series Doctoral Dissertations, 2014, no. 145, 46 p.
- [11] *Elektricheskaya os' serdtsa (EOS): sut', norma polozheniya i narusheniya* [The electrical axis of the heart (EAH): the essence, the norm of position and violation] URL: <http://sosudinfo.ru/serdce/eos-elektricheskaya-os-serdca> (accessed 23.03.16).
- [12] Man S., Maan A. C., Schlij M.J., Swenne C.A. Vectorcardiograph diagnostic & prognostic information derived from 12 lead electrocardiogram. *J. Electrocardiol*, 2015, no. 48, pp. 463–475.
- [13] Gurev V., Tavakolian K., Constantino J., Kaminska B., Blaber A.P. Mechanisms underlying isovolumic contraction and ejection peaks in seismocardiogram morphology. *J. of medical and biological engineering*, 2012, no. 32 (2), p. 103.

- [14] Paukkunen M.J.T., Linnavuo M.T., Sepponen R.E. A Portable Measurement System for the Superior-Inferior Axis of the Seismocardiogram. *J. of Bioengineering & Biomedical Science*, 2013, no. 3, pp. 123. DOI: 10.4172/2155-9538.1000123
- [15] García-González M.A., Argelagós-Palau A., Fernández-Chimeno M., Ramos-Castro J. Differences in QRS Locations due to ECG Lead: Relationship with Breathing. XIII Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing 2013, IFMBE Proceedings, 2014, v. 41, pp. 962–964. DOI: 10.1007/978-3-319-00846-2_238
- [16] Kouhyar Tavakolian Characterization and analysis of seismocardiogram for estimation of hemodynamic parameters. Diss. ... Dr. of Philosophy. Simon fraser university, 2010, 217 p.
- [17] Faynzil'berg L.S. *Kop'yuternaya elektrokardiografiya do i posle akademika N.M. Amosova* [Computer electrocardiography before and after academician N.M. Amosova]. *Upravlausie sistemy i masiny*, 2013, no. 3, pp. 3–13.
- [18] Kuznecov A.A. *Biofizika serdtsa. Metody obrabotki i analiza elektrokardiograficheskoy informatsii pri donozologicheskikh issledovaniyakh* [Biophysics of the heart. Methods of processing and analyzing electrocardiographic information in prenosological studies]. Vladimir: VIGU, 2012, 23 p.
- [19] Uspensky V.M. *Informatsionnaya funktsiya serdtsa. Teoriya i praktika diagnostiki zabolevaniy vnutrennikh organov metodom informatsionnogo analiza elektrokardiosignalov* [Information function of the heart. Theory and practice of diagnosis of diseases of internal organs by the method of information analysis of electrocardiograms]. Moscow: Planeta, 2016, 296 p.

Authors' information

Gruzevich Yuriy Kirillovich — Cand. Sci. (Tech.), Deputy general director for science of the «Scientific Production Unity Geophizika-NV» Stock Company, yukg@mail.ru

Achil'diev Vladimir Mikhaylovich — Cand. Sci. (Tech.), Chief designer of MNEMS of the «Scientific Production Unity Geophizika-NV» Stock Company, glmnems@geo-nv.com

Bedro Nikolay Anatol'evich — Deputy chief designer MNEMS head of department of the «Scientific Production Unity Geophizika-NV» Stock Company, job_nick@mail.ru

Evseeva Yuliya Nikolaevna — Engineer I category of the «Scientific Production Unity Geophizika-NV» Stock Company, sun51188@gmail.com

Komarova Mariya Nikolaevna — Chief engineer of the «Scientific Production Unity Geophizika-NV» Stock Company, maria-komarova86@mail.ru

Konnova Natal'ya Sergeevna — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Bauman Moscow State Technical University, nkonnova@bmstu.ru

Basarab Mikhail Alekseevich — Dr. Sci. (Ph.-Math.), Professor, Head of the Department of Information Security of the Bauman Moscow State Technical University, bmic@mail.ru

Basarab Dmitriy Alekseevich — Cand. Sci. (Medical), Lead surgeon, Head of the Cardiovascular department, St. Ioasaf's Belgorod Regional Hospital, basarab.74@yandex.ru

Uspenskiy Vyacheslav Maksimilianovich — Dr. Sci. (Medical), Professor of the Moscow Branch of the Kirov Military-medical Academy, medddik@mm.st

Received 19.04.2019.

Accepted for publication 15.07.2019.

АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ ТАКТОВОЙ ЧАСТОТЫ ПРОЦЕССОРОВ ОТ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ НОРМ КРИСТАЛЛОВ

А.Е. Фалин¹, В.В. Алексеев¹, А.Н. Щепанов¹, О.В. Киклевич¹,
Ю.Т. Котов², Т.Д. Знаменская²

¹ФГУП «МНИИРИП», 141002, Московская обл., г. Мытищи, ул. Колпакова, д. 2а

²МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

tzn957@gmail.ru

Рассматриваются вопросы, связанные с зависимостью тактовой частоты процессоров от топологической нормы изготовления кристаллов. Приведены некоторые аспекты влияния размеров кристаллов на тактовую частоту процессоров компаний AMD, Intel, Samsung, Qualcomm. Представлены графики зависимости тактовой частоты процессоров от топологических норм размеров кристаллов для компаний Intel, AMD, Samsung и Qualcomm. Прослежена динамика влияния уменьшения топологических норм кристаллов на тактовую частоту процессора. Представлены обобщенные характеристики зависимости тактовой частоты от топологических размеров кристаллов отечественных процессоров. Полученные результаты могут быть использованы при разработке перспективных планов развития отечественных процессоров.

Ключевые слова: процессор, топологическая норма, тактовая частота, технология, вычислительные системы

Ссылка для цитирования: Фалин А.Е., Алексеев В.В., Щепанов А.Н., Киклевич О.В., Котов Ю.Т., Знаменская Т.Д. Анализ зависимости тактовой частоты процессоров от топологических норм кристаллов // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2019. Т. 23. № 4. С. 76–81. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-76-81

Динамика развития полупроводниковых технологий определила технические приоритеты ведущих мировых производителей процессоров. Совершенствование технологии производства интегральных микросхем обусловило существенное улучшение технических характеристик. При этом разработчики особое внимание уделяют росту вычислительной мощности процессоров, которая определяется, в первую очередь, тактовой частотой работы ядра процессора.

Цель работы

Целью работы является рассмотрение вопросов, связанных с зависимостью тактовой частоты процессоров от топологических норм изготовления кристаллов.

Материалы и методы

Тактовая частота – один из основных факторов, влияющих на производительность вычислительных систем. Ее значение, как правило, определяется физическим размером кристалла чем меньше толщина кристалла, тем выше может быть частота работы процессора (рис. 1).

Анализ технической литературы и результаты эксплуатации ВС показывают, что снижение топологических норм позволяет не только уменьшить размеры кристалла, снизить его себестоимость, но и при прочих равных условиях реализации повысить его быстродействие [1–10]. Так, например, площадь кристалла процессора, изготовленного по технологии 90 нм, в 3–3,5 раза меньше площади аналогичной схемы, изготовленной на 180-нанометровой технологии. При этом техно-

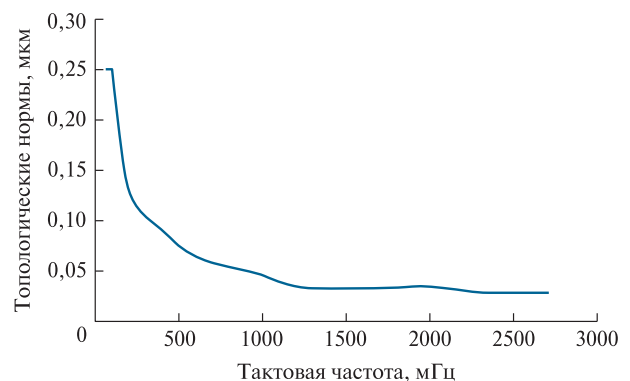


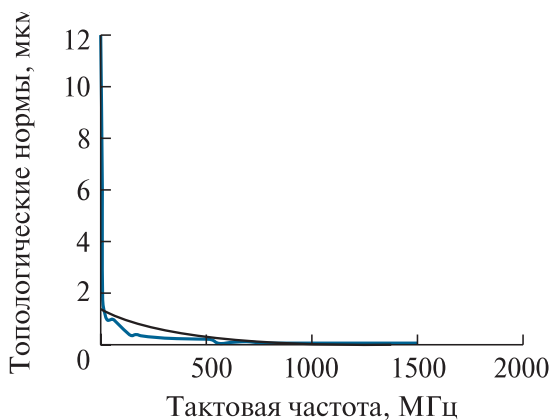
Рис. 1. Обобщающая характеристика зависимости тактовой частоты процессоров от топологических норм кристаллов для зарубежных разработок

Fig. 1. General characteristics of the dependence of the processor speed on the topological norms of crystals for foreign developments

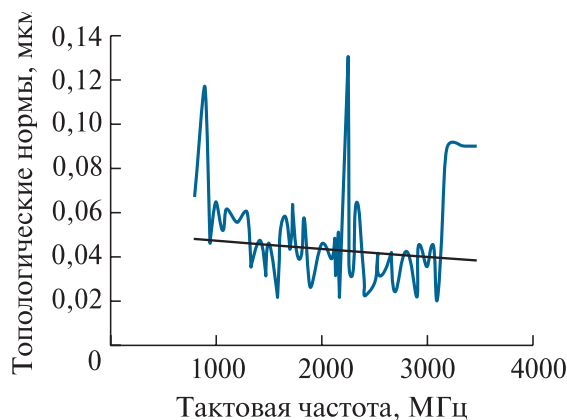
логия 90 нм позволяет увеличить степень интеграции микросхемы в 3 раза. Быстродействие же процессора 90 нм в 1,7 раза выше аналогичного показателя у процессора, изготовленного по норме в 180 нм. Снижение энергопотребления при этом составляет 1,5–2 раза. Таким образом, очевидны преимущества практического снижения топологических норм изготовления кристаллов процессоров.

Результаты и обсуждение

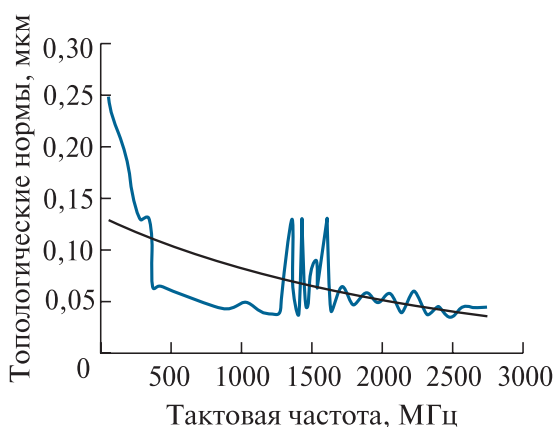
Зарубежный опыт указывает на то, что у каждой фирмы существуют свои подходы к проектированию кристаллов процессоров, которые в полной мере отражаются на зависимости такто-



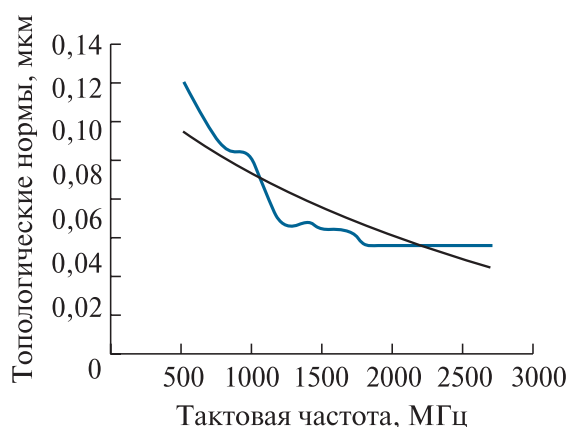
a



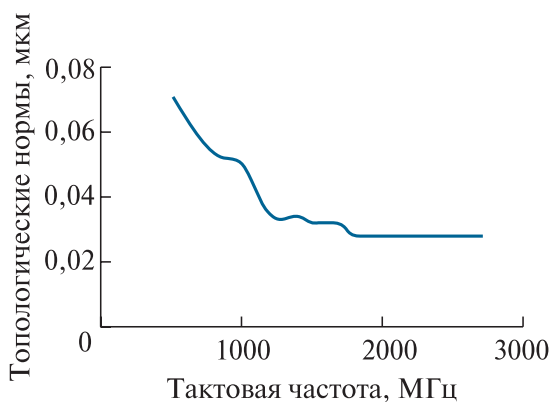
б



в



г



д

Рис. 2. Графики зависимости тактовой частоты процессоров от топологических норм размеров кристаллов для компаний Intel, AMD, Samsung и Qualcomm: *a, в, г, д* — соответственно процессоры фирм Intel, AMD, Samsung, Qualcomm; *б* — участок зависимости Intel в пределах тактовой частоты от 800 до 3460 МГц

Fig. 2. Graphs of the processor speed dependence on topological standards of crystal sizes for Intel, AMD, Samsung, and Qualcomm: *a, в, г, д* — processors by Intel, AMD, Samsung, Qualcomm, respectively; *б* — Intel dependence plot within the clock frequency from 800 to 3460 MHz

вых частот процессоров от топологических норм кристаллов.

Рассмотрим некоторые аспекты влияния размеров кристаллов на тактовую частоту процессоров компаний AMD, Intel, Samsung, Qualcomm.

У компаний Intel и AMD производство процессоров преимущественно отличается от производства других зарубежных фирм тем, что они доводят их архитектурно-структурную реализацию в «ручном» режиме до той степени, при которой обеспечивается наилучшее соответствие между тактовой частотой и размером кристалла.

Это позволяет «разогнать» процессоры технологии 0,18 мкм до работы вместо расчетной тактовой частоты 200 МГц до 800 МГц и более.

Анализируя процессоры на кристаллах компаний Intel, AMD, Samsung и Qualcomm, можно заметить влияние снижения топологических норм кристаллов на тактовую частоту процессора (рис. 2). При этом для разных моделей процессоров оно различно. Особенно это характерно для процессоров Intel и AMD. В открытых источниках поведение этой характеристики проявляется в скачкообразном изменении участков кривых.

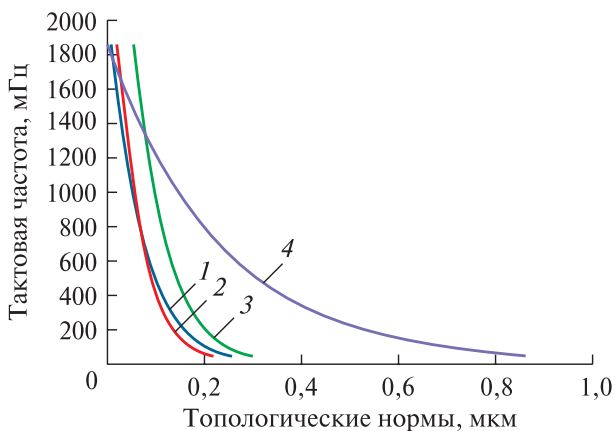


Рис. 3. Расчетные характеристики линий тренда процессоров: 1 — Samsung; 2 — Qualcomm; 3 — AMD; 4 — Intel
Fig. 3. The calculated characteristics of the trend lines of the processors: 1 — Samsung; 2 — Qualcomm; 3 — AMD; 4 — Intel

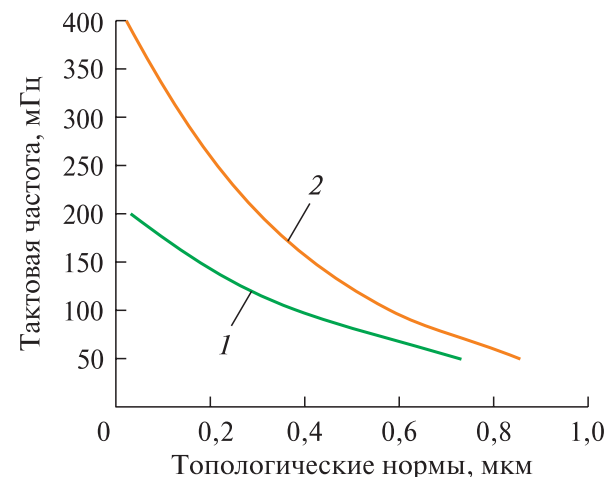


Рис. 4. Обобщенные характеристики зависимости тактовой частоты от топологических норм кристаллов отечественных процессоров: 1 — общий график по отечественным процессорам; 2 — общий график по отечественным процессорам на зарубежных кристаллах
Fig. 4. Generalized characteristics of the processor speed dependence on the topological norms of crystals of domestic processors: 1 — a general schedule for domestic processors; 2 — the general schedule for domestic processors based on foreign crystals

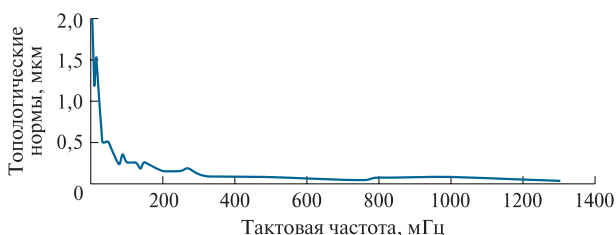


Рис. 5. Зависимость тактовой частоты от топологических норм кристаллов для отечественных процессоров
Fig. 5. The dependence of the processor speed on the topological standards of crystals for domestic processors

В целях удобства визуального восприятия и анализа рассматриваемых зависимостей целесообразно представить их линиями трендов (выделены черным цветом).

Приведем расчетные характеристики линий тренда (рис. 3):

$$y = -\frac{1}{14,05} \cdot \ln \frac{x}{3540} \text{ (для компании AMD);}$$

$$y = -\frac{1}{4,2} \cdot \ln \frac{x}{1861,8} \text{ (для компании Intel);}$$

$$y = -\frac{1}{14,49} \cdot \ln \frac{x}{2106,5} \text{ (для компании Samsung);}$$

$$y = -\frac{1}{18,87} \cdot \ln \frac{x}{2781,2} \text{ (для компании Qualcomm),}$$

где x и y — транспонированные координаты тактовой частоты и топологических норм на размеры кристалла.

Отечественные разработки в данном направлении по своим показателям уступают зарубежным компаниям. На рис. 4 и 5 изображены обобщенные характеристики зависимости тактовой частоты от топологических размеров кристаллов отечественных процессоров, где коричневым цветом обозначена зависимость с использованием зарубежных кристаллов.

Наибольших успехов добились производители АО «МЦСТ», разработавшие четырехъядерный процессор 1891BM6Я с 64-битной архитектурой SPARC v.9, тактовой частотой 1 ГГц по техпроцессу 90 нм. АО НПЦ «ЭЛВИС» с многоядерным сигнальным микропроцессором 1892BM14Я, изготовленным по КМОП (кремний-металл-оксид-полупроводник) технологии TSMC (Тайвань) по техпроцессу 40нм и максимальной рабочей частотой 750 (CPU)/ 500 (DSP) МГц.

В настоящее время в стране проводится комплекс мероприятий по сертификации и запуску производственных линий с технологическими процессами 65 и 28 нм. Это обстоятельство дает основание полагать, что производство отечественных процессоров будет независимым от международных санкций и позволит избавиться от импортозависимости. Отметим, что качественные показатели работы процессоров сложно привязать к каким-либо критериям. Каждая фирма разрабатывает процессоры со своими особенностями, учитывая имеющиеся технологические возможности.

Выводы

Большинство производителей отечественных интегральных микросхем, в том числе процессоров, как правило, используют зарубежные технологические линейки, адаптированные для

российского производства. В настоящее время это создает предпосылки для выпуска изделий по характеристикам, близким к таковым у зарубежных аналогов.

Тем не менее, пока наблюдается отставание отечественной технологии производства процессорных систем от зарубежной, хотя оно достаточно мало и не выглядит фатальным. В настоящее время ведущие российские предприятия — разработчики процессорных систем ориентированы на освоение самых перспективных технологий [11–20].

В заключение добавим, что многие из представленных материалов, полученные из открытых источников, представляют собой эмпирические выкладки. Тем не менее, данная статистика представляет интерес не только как аналитическая подборка, но и может служить обоснованием при разработке перспективных планов развития производства отечественных процессоров, для постановки научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ и составления федеральных целевых программ.

Список литературы

- [1] Рабаи Ж.М., Чандракасан А., Николич Б. Цифровые интегральные схемы. Методология проектирования. М.: Вильямс, 2007. 912 с.
- [2] Аваева Н.А., Наумов Ю.И., Фролкин В.Т. Основы микроэлектроники. М.: Радио и Связь, 1991. 288 с.
- [3] Шелохвостов В.П., Чернышов В.Н. Проектирование интегральных микросхем. Тамбов: Тамбовский ГТУ, 2008. 208 с.
- [4] Торгонский Л.А. Проектирование интегральных микросхем и микропроцессоров. Раздел 1. Томск: ТУСУР, 2011. 254 с.
- [5] Коледов Л.А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок. М.: Радио и связь, 1989. 400 с.
- [6] Пономарев М.Ф., Коноплев Б.Г. Конструирование и расчет микросхем и микропроцессоров. М.: Радио и связь, 1986. 251 с.
- [7] Гамкрелидзе С.А., Мальцева С.В., Митрофанов С.А., Котов Ю.Т. Развитие, особенности построения и функционирования 32-разрядных микропроцессоров. М.: Машиностроение, 2000. 189 с.
- [8] Матсон Э.А., Кржижановский Д.В. Справочное пособие по конструированию микросхем. Минск: Высш. шк., 1979. 208 с.
- [9] Ефимов И.Е., Козырь И.Я., Горбунов Ю.И. Микроэлектроника: Проектирование, виды микросхем, функциональная микроэлектроника. М.: Высш. шк., 1987. 416 с.
- [10] Бухтеев А.В. Методы и средства проектирования систем на кристалле // Chip News, 2003. № 4. С. 4–8, 11–14.
- [11] Сергеев С.Л. Архитектуры вычислительных систем. СПб.: БХВ-Петербург, 2010. 240 с.
- [12] Акустооптические процессоры спектрального типа / Грачев С.В., Наумов К.П., Ушаков В.Н., Бышевский-Конопко О.А., Жогун В.Н., Мазур М.М., Пожар В.Э., Проклов В.В., Пустовойт В.И., Тябликов А.В. М.: Радиотехника, 2012. 192 с.
- [13] Гук М. Процессоры Intel: от 8086 до Pentium II. М.: СПб: Питер, 2009. 224 с.
- [14] Гук М. Процессоры Pentium II, Pentium Pro и просто Pentium. М.; СПб: Питер, 2009. 288 с.
- [15] Керделлан К. Дети процессора. Как Интернет и видеоигры формируют завтрашних взрослых. М.: У-Фактория, 2015. 933 с.
- [16] Наумов К.П., Ушаков В.Н. Акустооптические сигнальные процессоры. М.: Science Press, 2015. 899 с.
- [17] Антошина И.В., Котов Ю.Т. Микропроцессоры и микропроцессорные системы (аналитический обзор). М.: МГУЛ, 2005. 432 с.
- [18] Солонина А., Улахович Д., Яковлев Л. Алгоритмы и процессоры цифровой обработки сигналов. СПб.: БХВ-Петербург, 2009. 464 с.
- [19] Ушаков В.Н. Акустооптические процессоры корреляционного типа. М.: Радиотехника, 2013. 184 с.
- [20] Корнеев В.В., Киселев А.В. Современные микропроцессоры. СПб.: БХВ-Петербург, 2003. 440 с.

Сведения об авторах

Фалин Алексей Евгеньевич — научный сотрудник ФГУП «МНИИРИП», parke@mail.ru
Алексеев Виктор Валентинович — первый зам. директора ФГУП «МНИИРИП», ekb_centra@mail.ru
Щепанов Андрей Николаевич — нач. управления ФГУП «МНИИРИП», schipanov@mniirip.ru
Киклевич Олег Владимирович — ст. науч. сотр. ФГУП «МНИИРИП», parke@mail.ru
Котов Юрий Терентьевич — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), kotov46@inbox.ru
Знаменская Татьяна Дмитриевна — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), tzn957@gmail.com

Поступила в редакцию 19.04.2019.
 Принята к публикации 15.07.2019.

THE ANALYSIS OF PROCESSOR SPEED DEPENDENCE ON GEOMETRY RULES OF CRYSTALS

A.E. Falin¹, V.V. Alekseev¹, A.N. Shchepanov¹, O.V. Kiklevich¹,
Y.T. Kotov², T.D. Znamenskaya²

¹MNIIRIP, st. Kolpakova, 2a, 141002, Mytishchi, Moscow region, Russia

²BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

tzn957@gmail.ru

Issues related to the dependence of the processor speed on the topological rate of crystal manufacturing are considered. Some aspects of the influence of crystal sizes on processors speed from AMD, Intel, Samsung, Qualcomm are presented. The graphs of the dependence of the processor speed on topological standards of crystal sizes for Intel, AMD, Samsung and Qualcomm are presented. The dynamics of the effect of a decrease in the topological norms of crystals on the processor clock frequency is traced. The generalized characteristics of the dependence of the clock frequency on the topological sizes of crystals of domestic processors are presented. The results can be used to develop long-term development plans for domestic processors.

Keywords: CPU, topological norm, processor speed, technology, computing systems

Suggested citation: Falin A.E., Alekseev V.V., Shchepanov A.N., Kiklevich O.V., Kotov Y.T., Znamenskaya T.D. *Analiz zavisimosti taktovoy chastoty protsessorov ot topologicheskikh norm kristallov* [The analysis of processor speed dependence on geometry rules of crystals]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 4, pp. 76–81. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-76-81

References

- [1] Rabai Zh.M., Chandrakasan A., Nikolich B. *Tsifrovye integral'nye skhemy. Metodo-logiya proektirovaniya* [Digital integrated circuits. Design methodology]. Moscow: Williams, 2007, p. 912.
- [2] Avaeva N.A., Naumov Yu.I., Frolkin V.T. *Osnovy mikroelektroniki* [Fundamentals of microelectronics]. Moscow: Radio i svyaz', 1991, 288 p.
- [3] Shelokhovostov V.P., Chernyshov V.N. *Proektirovanie integral'nykh mikroskhem* [Integrated Circuit Design]. Tambov: Tambov GTU, 2008, 208 p.
- [4] Torgonskiy L.A. *Proektirovanie integral'nykh mikroskhem i mikroprotsessorov* [Designing integrated circuits and microprocessors]. Tomsk: TUSUR, 2011, Section 1, 254 p.
- [5] Koledov L.A. *Tekhnologiya i konstruksii mikroskhem, mikroprotsessorov i mikro-sborok* [Technology and design of microcircuits, microprocessors and micro assemblies]. Moscow: Radio i svyaz', 1989, 400 p.
- [6] Ponomarev M.F., Konoplev B.G. *Konstruirovaniye i raschet mikroskhem i mikropro-tsektorov* [Design and calculation of microcircuits and microprocessors]. Moscow: Radio i svyaz', 1986, 251 p.
- [7] Gamkrelidze S.A., Mal'tseva S.V., Mitrofanov S.A., Kotov Yu.T. *Razvitie, osobennosti postroeniya i funktsionirovaniya 32-razryadnykh mikroprotsessorov* [Development, features of construction and operation of 32-bit microprocessors]. Moscow: Mashinostroyeniye, 2000, 189 p.
- [8] Matson E.A., Krzhizhanovskiy D.V. *Spravochnoe posobie po konstruirovaniyu mikroskhem* [Handbook for the design of microshem]. Minsk: High School, 1979, 208 p.
- [9] Efimov I.E., Kozyr' I.Ya., Gorbunov Yu.I. *Mikroelektronika: Proektirovanie, vidy mikroskhem, funktsional'naya mikroelektronika* [Microelectronics: Design, types of microcircuits, functional microelectronics]. Moscow: Higher School, 1987, 416 p.
- [10] Bukhteev A.V. *Metody i sredstva proektirovaniya sistem na kristalle* [Methods and tools for designing systems on a chip] *Chip News*, 2003, no. 4, p. 4–8, 11–14.
- [11] Sergeev S.L. *Arkhitektury vychislitel'nykh sistem* [Computer architecture]. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2010, 240 p.
- [12] Grachev, SV, Naumov, KP, Ushakov, VN, Byshevsky-Konopko, OA, Zhogun, VN, Mazur, MM, Pozhar, VE, Proklov V.V., Pustovoi V.I., Tyablikov A.V. *Akustoopticheskie protsessory spektral'nogo tipa* [Acousto-optic processors of spectral type] Moscow: Radio Engineering, 2012, 192 p.
- [13] Guk M. *Protsessory Intel: ot 8086 do Pentium II* [Intel processors: from 8086 to Pentium II]. Moscow, St. Petersburg: Piter, 2009, 224 p.
- [14] Guk M. *Protsessory Pentium II, Pentium Pro i prosto Pentium* [Processors Pentium II, Pentium Pro and just Pentium]. Moscow, St. Petersburg: Piter, 2009, 288 p.
- [15] Kerdellan K. *Deti protsessora. Kak Internet i videoigry formiruyut zavtrash-nikh vzroslykh* [Children of the processor. How the Internet and video games shape tomorrow's adults]. Moscow: U-Factoriya, 2015, 933 p.
- [16] Naumov K.P., Ushakov V.N. *Akustoopticheskie signal'nye protsessory* [Acousto-optic signal processors]. Moscow: Science Press, 2015, 899 p.
- [17] Antoshina I.V., Kotov Yu.T. *Mikroprotsessory i mikroprotsessornye sistemy (analiti-cheskiy obzor)* [Microprocessors and microprocessor systems (analytical review)]. Moscow: MGUL, 2005, 432 p.
- [18] Solonina A., Ulakhovich D., Yakovlev L. *Algoritmy i protsessory tsifrovoy obrabotki signalov* [Algorithms and processors of digital signal processing]. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2009, 464 p.
- [19] Ushakov V.N. *Akustoopticheskie protsessory korrelyatsionnogo tipa* [Acousto-optic processors of correlation type]. Moscow: Radio Engineering, 2013, 184 p.
- [20] Komeev V.V., Kiselev A.V. *Sovremennye mikroprotsessory* [Modern microprocessors]. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2003, 440 p.

Authors' information

Falin Alexey Evgenievich — Researcher, MNIIRIP, parke@mail.ru

Alekseev Viktor Valentinovich — First deputy Director, MNIIRIP, ekb_centra@mail.ru

Schepanov Andrei Nikolaevich — Head of Department, MNIIRIP, schipanov@mniirip.ru

Kiklevich Oleg Vladimirovich — Senior Researcher, MNIIRIP, parke@mail.ru

Kotov Yuriy Terentevich — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), kotov46@inbox.ru

Znamenskaya Tat'yana Dmitrievna — Cand. Sci. (Tech.), Associated Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), tzn957@gmail.com

Received 19.04.2019.

Accepted for publication 15.07.2019

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ ВЫХОДА ИЗ СТРОЯ ОДНОКРАТНО ЗАПИСЫВАЕМОГО ОПТИЧЕСКОГО ДИСКА С ЗАПИСЬЮ В ПРОЦЕССЕ ХРАНЕНИЯ В ДОЛГОВРЕМЕННОМ АРХИВЕ

А.В. Чернышов

МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1
sch-ru@yandex.ru

Рассмотрена задача точечной оценки значения параметра вероятности выхода из строя однократно записываемого оптического диска с записью при длительном архивном хранении по результатам натурных экспериментов. Выполнены точечные оценки значения вероятности выхода из строя для трех типов дисков — CD-R, DVD+-R, BD-R частично по опубликованным ранее результатам натурных экспериментов и по полученным результатам экспериментов, проведенных автором. Показано, что по имеющимся данным нет возможности получить оценку искомого параметра меньше 10^{-3} , а фактически по результатам разных рассмотренных экспериментов значение параметра попадает в диапазон от 0,01 до 0,2.

Ключевые слова: долговременные электронные архивы информации, надежность хранения информации, оптические диски однократной записи, оценка вероятности потери информации, натурные эксперименты

Ссылка для цитирования: Чернышов А.В. Определение значения вероятности выхода из строя однократно записываемого оптического диска с записью в процессе хранения в долговременном архиве // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2019. Т. 23. № 4. С. 82–87. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-82-87

Согласно действующему стандарту [1], долговременные электронные архивы следует создавать на однократно записываемых носителях (типа WORM), к которым в настоящее время относятся только оптические диски с однократной записью, такие, как CD-R, DVD+-R, BD-R. В связи с повсеместной информатизацией жизни, создание локальных долговременных электронных архивов стало важной необходимостью для многих организаций [2, 3].

С течением времени носители информации выходят из строя, и оптические диски не исключение. Так, в работе [4] упоминается эксперимент, который показал, что при хранении оптических дисков с записью в течение 2 лет примерно каждый десятый диск теряет читабельность.

При проектировании электронных архивов длительного хранения информации должны быть приняты меры к ее надежному сохранению на носителях, которые с определенной вероятностью могут выйти из строя. Однако применительно к однократно записываемым оптическим дискам невозможно применить методы испытаний, обычно используемые в технике для определения вероятности выхода из строя конкретных образцов. Например, в отличие от жестких дисков, запись на которые может быть выполнена многократно, оптический диск однократной записи может быть записан только единожды и, следовательно, это должно быть сделано только у потребителя — изготовитель не может провести такой тест.

Некоторые изготовители проводят выборочные («разрушающие») тесты своих оптических

дисков из каждой партии до передачи потребителям. Эти тесты, во-первых, как и следовало ожидать, показывают лишь усредненную картину, а не индивидуальные особенности каждого диска из партии. Во-вторых, такие тесты, как правило, проводятся по специальной ускоренной методике [5], результатом которой является лишь оценка «времени службы», что не может свидетельствовать о вероятности выхода из строя (потере информации) конкретного диска.

Известные методические рекомендации по созданию долговременных электронных архивов не содержат предложений по конкретным расчетным моделям для определения структуры создаваемого архива, а ограничиваются общим замечанием о необходимости наличия минимум трех дисков с каждым фрагментом информации, причем от разных производителей [6–8].

В действительности не составляет большого труда построить теоретическую модель вероятности потери какой-то части информации в архиве [9–12], но при выполнении практических расчетов главной проблемой остается выбор значения параметра q — вероятности выхода из строя отдельно взятого оптического диска.

Цель работы

Целью настоящей работы является обоснование выбора модельного значения параметра q для проведения расчетов по надежности сохранения информации на оптических дисках однократной записи для наиболее распространенных в настоящее время типов дисков — CD-R, DVD+-R, BD-R.

Материалы и методы

Найдем точечную оценку значения параметра q . Теоретически с течением времени его значение должно изменяться, что подчеркивается, например, в работе [6]. Однако на практике какие-либо реальные данные, подтверждающие этот тезис, найти невозможно. Поэтому нельзя оценить вид функции $q(t)$, тем более значение ее параметров. Такое положение является следствием самой природы однократно записанных дисков — с течением времени диски деградируют по некоторому функциональному закону, но характерно только для конкретной партии дисков. Новые партии дисков по характеру деградации будут подчиняться некоторому иному закону, неизвестному до того, как на дисках появятся записи и они подвергнутся длительному хранению.

Проблема состоит еще и в том, что оптические диски, сохраняемые без записи, также достаточно быстро утрачивают свои технические характеристики. Поэтому их нельзя запасать впрок, и для каждого нового блока записываемой информации следует приобретать новые, недавно выпущенные диски.

Поскольку диски CD-R, DVD+-R, BD-R предназначены для разных технологий записи, оценим значение параметра q отдельно для каждого из указанных типов дисков. При этом будем исходить из данных, полученных в результате реального хранения дисков с записью соответствующего типа в течение нескольких лет.

Результаты и обсуждение

Диски типа CD-R. Для дисков типа CD-R больше всего опубликовано данных по экспериментам с реальным длительным хранением записанных дисков. Правда, практически во всех известных экспериментах исполнители не сохраняли информацию о первоначальном состоянии дисков (например, о скорости чтения данных или количестве ошибок при чтении). Поэтому в момент тестирования дисков не было возможности оценить степень их деградации. Все описанные тесты выполнялись по принципу «информация считалась/информация не считалась» и только в последнем случае («информация не считалась») фиксировался отказ.

Опираясь на данные таких публикаций, можно сделать вывод только о минимальном значении q^* , т. е. точечной оценке истинного значения параметра q .

В работе [4], как было указано выше, в записанной партии дисков CD-R через 2 года отказал примерно каждый десятый диск, т. е. по истечении двухлетнего срока получено $q^* = 0,1$. К сожалению, в источнике не приведены другие

условия проведения эксперимента, в том числе объем тестируемой партии дисков, поэтому нельзя сказать о доверительном интервале этой оценки, за исключением общего количества записанных дисков — 30 шт., каждый из которых от разных производителей.

Эксперимент проводился более 15 лет тому назад. Есть мнение о том, что за прошедшие годы технологии изготовления и записи дисков CD-R были существенно усовершенствованы, однако в работе [6] раскрыто узкое понимание производителями усовершенствования технологий — это удешевление из производства. Отсюда ясно, что проблема выбора дисков CD-R для архивных записей пока не решена и остается настолько острой, что даже нет рабочих рекомендаций [6] по выбору дисков для записи конкретных производителей и марок дисков (типа Gold Archive [17]). Вместо этого предлагается сделать не менее трех копий каждого диска, для чего выбрать диски с разным типом записываемой поверхности (phthalocyanine [18], azo [19]) из лучших, имеющих ныне на рынке. Определять «лучшие» следует не по стоимости (которая может быть завышена в маркетинговых целях), а по результатам специально проводимых тестов с низкоуровневым контролем количества ошибок чтения сразу после записи.

В работе [14] приводятся несколько более конкретные данные, полученные в результате проведенного тестирования 600 архивных дисков, записанных в разные годы со сроком хранения от 8 до 11 лет. Авторы утверждают [14], что выборочный детальный тест 25 дисков показал отсутствие зависимости количества ошибок чтения дисков (без потери воспроизводимости информации) от времени хранения.

Тем не менее надо признать, что авторы не обладают информацией о первоначальном количестве ошибок чтения каждого записанного диска (такая информация не зафиксирована при осуществлении записи). К тому же 25 дисков — это выборка, не позволяющая получить статистически значимые результаты.

Авторы [14] провели тестирование всех 600 дисков на воспроизведение информации. В результате с девяти дисков было проблематично извлечь информацию, т. е. $q^* = 0,015$.

Дадим статистическую оценку полученным результатам по известной формуле Лапласа [20]:

$$P(q^* - q(< \varepsilon)) \approx 2\Phi\left(\frac{\varepsilon\sqrt{N}}{\sqrt{q^*(1-q^*)}}\right).$$

Здесь при $\varepsilon = 0,015$ получаем $P = 0,997$, т. е. с близкой к единице вероятностью $q < 0,03$.

В данном случае удалось оценить истинное значение q — оно не превышает 0,03 с вероятностью 0,997 (а также не превышает 0,035 с вероятностью 0,9999).

Еще один эксперимент описан в работе [15], в которой приведена информация о тестировании нескольких групп дисков.

В первой группе из 70 проверенных дисков (все диски к моменту тестирования имели срок хранения 5 лет) четыре диска получили оценку «очень плохо», т. е. фактически находились в состоянии отказа.

Во второй группе из 368 дисков (к моменту тестирования диски имели сроки хранения от одного года до 11 лет) отказавших не оказалось.

В третьей группе из 51 диска (диски имели сроки хранения от 9 до 12 лет) отказавших также не было.

Оценим значение параметра q для каждой группы с вероятностью P не ниже 0,9.

Таким образом, для первой группы $q^* = 4 / 70 = 0,057$, что при $\varepsilon = 0,057$ позволяет для $P = 0,96$ утверждать: $q < 0,114$ (для $q < 0,1$ будем иметь $\varepsilon = 0,043$ и $P = 0,88$, что меньше желательной вероятности; для $P = 0,9$ — $\varepsilon = 0,046$ и $q < 0,103$);

для второй группы $q^* < 1 / 368 = 0,0027$, что для $P = 0,9$ дает $\varepsilon = 0,0045$ и $q < 0,0072$;

для третьей группы $q^* < 1 / 51 \approx 0,02$, что для $P = 0,9$ дает $\varepsilon = 0,032$ и $q < 0,052$.

Таким образом, в целях практических расчетов можно рекомендовать для архивов на базе дисков CD-R следующие значения q :

«оптимистический» сценарий — 0,01;

«пессимистический» сценарий — 0,1;

«наихудший» сценарий — 0,12.

Диски типа DVD-R. Практически нет публикаций, в которых были бы приведены данные о результатах реального хранения дисков DVD-R с записью. Только в единственной найденной работе [15] приведены данные о тестировании 26 дисков DVD-R, из которых 11 получили оценку «очень плохо». Диски хранились от 1 года до 6 лет. Отказы были зафиксированы в группах дисков с возрастом от 4 до 6 лет, причем наибольшее количество отказавших дисков имело срок хранения 5 лет. К сожалению, приведенное количество дисков столь мало, что его невозможно использовать для получения статистически значимых оценок. (Можно получить $q^* = 11 / 26 \approx 0,4$; тогда для $\varepsilon = 0,1$ имеем $P = 0,70$, для $\varepsilon = 0,15$ имеем $P = 0,88$, а для $\varepsilon = 0,2$ имеем $P = 0,96$, т. е. с вероятностью, близкой к единице, q можно оценить как «не больше 0,6», что неприемлемо).

В целях получения более реальной оценки вероятности выхода из строя дисков с записью типа DVD+-R при длительном хранении автор

выполнил тестирование личного архива дисков DVD+-R, которые хранились в домашних условиях, близких к рекомендуемым стандартам [16]. Диски были приобретены несколькими партиями и от разных производителей. Срок хранения дисков составил от 8 до 9 лет. Тестирование выполнялось на простое считывание информации, поскольку в момент закладки дисков на хранение был проведен только простейший тест верификации на читабельность — не были зафиксированы ни скорость чтения, ни контрольные суммы файлов, ни другие характеристики дисков.

Всего протестировали 291 диск. Информация была считана со всех дисков, т. е. получено $q^* < 1 / 291 \approx 0,003$. Задавая $\varepsilon = 0,007$, получаем $P \approx 0,95$, т. е. на интервале 8 лет с вероятностью 95 % можно считать, что $q < 0,01$. Именно это значение ($q = 0,01$), вероятно, и должно использоваться в практических расчетах архивов.

Отметим, что в процессе записи при верификации в одной из приобретенных партий обнаружено крайне низкое качество дисков с записью. После нескольких экспериментов зафиксирован факт наличия брака в партии, поэтому диски из нее в архив не вошли. Тем не менее автор рекомендовал для подстраховки делать дополнительный, «пессимистический», расчет с $q = 0,1$.

Диски типа BD-R. Для дисков типа BD-R, по-видимому, нет опубликованных данных по отказам в процессе реального хранения в течение какого-либо длительного периода времени. В связи с этим для экспериментального обоснования значения q автор вынужден был поставить собственный эксперимент [13]. Была выполнена запись партии дисков BD-R трех производителей в количестве 189 шт. Диски разместили в хранилище с требуемыми нормальными условиями окружающей среды.

Спустя один год провели проверку считываемости информации с дисков.

В отличие от всех описанных экспериментов, где проверка считываемости дисков проверялась «по факту», в данном случае эксперимент ставился сознательно, поэтому получена информация о первоначальной скорости считывания информации с каждого записанного диска, а также контрольная сумма каждого файла (контрольная сумма — уникальное число, полученное в результате обработки содержимого файла каким-либо алгоритмом). В связи с этим, имеется возможность оценить не только целостность информации (по совпадению контрольной суммы, что значительно лучше, чем просто «читается/не читается»), но и возможные признаки деградации каждого диска, выражающиеся в значительно увеличившемся времени считывания информации.

В результате тестирования дисков установлены несчитываемость информации с двух дисков и сильное снижение скорости считывания у 11 дисков.

Таким образом, для отказавших дисков («оптимистический» вариант) получаем $q^* < 2 / 189 \approx 0,01$. Задавая $\varepsilon = 0,02$, получаем $P \approx 0,99$ (для $\varepsilon = 0,01$, получаем $P \approx 0,82$, что недостаточно, т. е. можно считать, что в течение одного года $q < 0,03$).

С учетом деградировавших дисков («пессимистический» вариант) получаем $q^* < (2 + 11) / 189 \approx 0,07$. Задавая $\varepsilon = 0,05$, получаем $P \approx 0,99$, т. е. можно считать, что в течение одного года $q < 0,12$.

Выводы

По результатам исследования можно утверждать, что при проведении расчетов проектов архивных хранилищ электронной информации в качестве наихудшей вероятности выхода из строя оптического диска можно пользоваться значением 0,12. Если есть уверенность в высоком качестве применяемых дисков, то расчеты следует проводить с вероятностью выхода из строя не ниже 0,03 для диска BD-R и 0,01 для диска DVD+-R. Применение дисков CD-R для новых хранилищ не имеет смысла вследствие их низкой емкости.

Список литературы

- [1] ГОСТ Р 54989-2012 / ISO TR 18492:2005 Обеспечение долговременной сохранности электронных документов. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200096286> (дата обращения: 15.11.2018)
- [2] Робот-библиотекарь поселился в новом кампусе СПбГУ «Михайловская дача». URL: <http://spbu.ru/smi/o-nas-pishut/24726-robot-bibliotekar-poselilsya-v-novom-kampuse-spbgu-mikhajlovskaya-dacha.html> (дата обращения: 13.11.2015).
- [3] Российские организации начинают строить электронные архивы на оптических дисках // Ассоциация электронных торговых площадок. URL: <http://www.aetrp.ru/market-news/item/400867>. (дата обращения 13.11.2015).
- [4] Устинов В. Хранение данных на CD- и DVD-дисках: на наш век хватит? // BROADCASTING: Телевидение и радиовещание, 2006. № 4. URL: http://www.broadcasting.ru/articles2/Oborandteh/hranenie_dannyh_na_CD_DVD_diskah (дата обращения: 10.12.2018).
- [5] ISO/IEC 10995:2011(E) Information technology – Digitally recorded media for information interchange and storage – Test method for the estimation of the archival lifetime of optical media. 28 pp. URL: <https://www.iso.org/standard/56910.html> (дата обращения: 10.12.2018)
- [6] Bradley K. Risks Associated With the Use of Recordable CDs and DVDs as Reliable Storage Media in Archival Collections: Strategies and Alternatives. Paris: UNESCO, 2006. 31 p.

Сведения об авторе

Чернышов Александр Викторович — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), sch-ru@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.04.2019.

Принята к публикации 15.07.2019.

- [7] Юмашева Ю.Ю. Методические рекомендации по электронному копированию архивных документов и управлению полученным информационным массивом. М.: Росархив. ВНИИДАД, 2012, 125 с.
- [8] Рекомендации по комплектованию, учету и организации хранения электронных архивных документов в государственных и муниципальных архивах. М.: Росархив. ВНИИДАД, 2013, 49 с.
- [9] Чернышов А.В. К вопросу о применении оптических дисков для создания долговременных электронных архивных хранилищ информации небольших организаций // Информационные технологии, 2016. Т. 22. № 8. С. 635–640.
- [10] Чернышов А.В. Модель надежности хранения информации на современных библиотеках оптических дисков, объединенных в массивы RAID-6 // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение, 2017. № 3. С. 65–75. DOI: 10.18698/0236-3933-2017-3-65-75
- [11] Чернышов А.В. Метод повышения надежности хранения информации в долговременных электронных хранилищах на оптических дисках, организованных в массивы RAID-6, за счет смешивания дисков запасных копий // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение, 2017. № 4. С. 88–97. DOI: 10.18698/0236-3933-2017-4-88-97
- [12] Чернышов А.В. Исследование свойств долговременных электронных архивных хранилищ информации на оптических дисках, организованных в структуры RAID-5 // Информационные технологии, 2018. Т. 24. № 9. С. 586–593. DOI: 10.17587/it.24.586-593
- [13] Чернышов А.В. Постановка натурного эксперимента по определению вероятности выхода из строя дисков типа BD-R с записью в процессе хранения // Системный администратор, 2018. № 5 (186). С. 76–79.
- [14] van Ooijen P.M.A., Viddeleer A.R., Meijer F., Oudkerk M. Accessibility of Data Backup on CD-R after 8 to 11 years // J Digit Imaging, 2010, no. 23, pp. 95. DOI: 10.1007/s10278-008-9161-9.
- [15] Пилипчук М.И., Балакирев А.Н., Дмитриева Л.В., Залаев Г.З. Рекомендации по обеспечению сохранности информации, записанной на оптических дисках (Тестирование выборочного массива документов федеральных архивов). М.: РГАНТД, 2011, 52 с.
- [16] Чернышов А.В. Оценка вероятности выхода из строя оптического диска DVD-R с записью по результатам натурного эксперимента // Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации: сб. тр. XXVII Междунар. науч.-техн. конф. Алушта, 14–20 сентября 2018. Тамбов: ПГТУ, 2018. С. 272.
- [17] Gold Archive DVD-R/+R. URL: <http://www.mam-a-store.com/golddvd.html> (дата обращения 03.03.2019).
- [18] CD-R носители. URL: <https://www.ixbt.com/storage/cdr.shtml> (дата обращения 03.03.2019).
- [19] Verbatim: Технологии изготовления. URL: <https://www.verbatim.ru/ru/article/core-technologies/> (дата обращения 03.03.2019).
- [20] Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Наука, 1988. 480 с.

EVALUATION OF SINGLE RECORDED OPTICAL DISC WITH RECORDING FAILURE PROBABILITY DURING STORAGE IN A LONG-TERM ARCHIVE

A.V. Chernyshov

BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

sch-ru@yandex.ru

The issue of a dotted estimate of the probability failure parameter of a write-once optical disc with recording during long-term archival storage based on the results of field experiments is considered. Dotted estimates of the probability of failure for three types of discs CD-R, DVD + -R, BD-R were made partially based on previously published results of field experiments and on the results of experiments conducted by the author. It is shown that, according to the available data, it is not possible to obtain an estimate of the desired parameter less than 10^{-3} , but in fact, according to the results of the various experiments examined the parameter falls into the range from 0,01 to 0,2.

Keywords: long-term electronic archives of information, reliability of information storage, optical discs of single recording, evaluation of the probability of loss of information, natural experiments

Suggested citation: Chernyshov A.V. *Opreделение znacheniya veroyatnosti vykhoda iz stroya odnokratno zapisyvaemogo opticheskogo diska s zapis'yu v protsesse khraneniya v dolgovremennom arkhive* [Evaluation of single recorded optical disc with recording failure probability during storage in a long-term archive]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 4, pp. 82–87. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-82-87

References

- [1] GOST R 54989–2012 / ISO TR 18492:2005 *Obespechenie dolgovremennoy sokhrannosti elektronnykh dokumentov* [GOST R 54989–2012 / ISO TR 18492:2005. Ensuring long-term preservation of electronic records] Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200096286> (accessed 15.11.2018).
- [2] *Robot-bibliotekar' poselilsya v novom kampuse SPbGU «Mikhaylovskaya dacha»*. [Robot librarian settled in the new campus of SPSU «Mikhailovskaya dacha»]. Available at: <http://spbu.ru/smi/o-nas-pishut/24726-robot-bibliotekar-poselilsya-v-novom-kampuse-spbgu-mikhajlovskaya-dacha.html> (accessed 13.11.2015).
- [3] *Rossiyskie organizatsii nachinayut stroit' elektronnye arkhivy na opticheskikh diskakh*. [Russian organizations are beginning to build electronic archives on optical discs.] Association of electronic trading platforms. Available at: <http://www.aetp.ru/market-news/item/400867> (accessed 13.11.2015).
- [4] Ustinov V. *Khranenie dannykh na CD- i DVD-diskakh: na nash vek khvatit?* [Data storage on CD and DVD: on our century will suffice?]. BROADCASTING: Televidenie i radioveshhanie. [Television and broadcasting], 2006, no. 4. Available at: http://www.broadcasting.ru/articles2/Oborandteh/hranenie_dannyh_na_CD_DVD_diskah (accessed 10.12.2018).
- [5] ISO/IEC 10995:2011(E) Information technology — Digitally recorded media for information interchange and storage — Test method for the estimation of the archival lifetime of optical media. 28 pp. Available at: <https://www.iso.org/standard/56910.html> (access date: 10.12.2018).
- [6] Bradley K. *Risks Associated Collectives: Strategies and Alternatives*. Paris: UNESCO, 2006, 31 p.
- [7] Yumasheva Yu.Yu. *Metodicheskie rekomendatsii po elektronnomu kopirovaniyu arkhivnykh dokumentov i upravleniyu po-luchennym informatsionnym massivom* [Guidelines for electronic copying of archival documents and management of the resulting information array]. Moscow: Rosarhiv. VNIIDAD, 2012, 125 p.
- [8] *Rekomendatsii po komplektovaniyu, uchetu i organizatsii khraneniya elektronnykh arkhivnykh dokumentov v gosudarstvennykh i munitsipal'nykh arkhivakh* [Recommendations on acquisition, accounting and organization of storage of electronic archival documents in state and municipal archives]. Moscow: Rosarhiv. VNIIDAD, 2013, 49 p.
- [9] Chernyshov A.V. *K voprosu o primeneni opticheskikh diskov dlya sozdaniya dolgovremennykh elektronnykh arkhivnykh khranilishch informatsii nebol'shikh organizatsiy* [To the question of the optical discs application for long term digital archive storage of small organizations.] *Informacionnye tehnologii* [Information Technologies], 2016, v. 22, no. 8, pp. 635–640.
- [10] Chernyshov A.V. *Model' nadezhnosti khraneniya informatsii na sovremennykh bibliotekakh opticheskikh diskov, ob'edinennykh v massiv RAID 6* [Model of reliability of information storage on modern libraries of optical disks combined in RAID 6 arrays] *Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Ser. Priborostroenie*, 2017, no. 3, pp. 65–75. DOI: 10.18698/0236-3933-2017-3-65-75
- [11] Chernyshov A.V. *Metod povysheniya nadezhnosti khraneniya informatsii v dolgovremennykh elektronnykh khranilishchakh na opticheskikh diskakh, organizovannykh v massiv RAID 6, za schet smeshvaniya diskov zapasnykh kopiy* [The method of increasing the reliability of information storage in long-term electronic storages on optical disks organized in RAID 6 arrays by mixing backup disks]. *Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Ser. Priborostroenie*, 2017, no. 4, pp. 88–97. DOI: 10.18698/0236-3933-2017-4-88-97
- [12] Chernyshov A.V. *Issledovanie svoystv dolgovremennykh elektronnykh arkhivnykh khranilishch informatsii na opticheskikh diskakh, organizovannykh v strukture RAID-5*. [The study of the properties of long-term electronic archival information storage on optical disks organized into a structure of RAID-5.] *Informacionnye tehnologii* [Information Technologies], 2018, v. 24, no. 9, pp. 586–593. DOI: 10.17587/it.24.586-593
- [13] Chernyshov A.V. *Postanovka naturного eksperimenta po opredeleniyu veroyatnosti vykhoda iz stroya diskov tipa BD-R s zapis'yu v protsesse khraneniya*. [Production of natural experiment of determining the probability of failure of BD-R recorded discs during storage] *Sistemnyy administrator* [System administrator] 2018, no. 5 (186), pp. 76–79.
- [14] van Ooijen P.M.A., Viddeleer A.R., Meijer F., Oudkerk M. *Accessibility of Data Backup on CD-R after 8 to 11 years*. *J Digit Imaging*, 2010, no. 23, pp. 95. DOI: 10.1007/s10278-008-9161-9

- [15] Pilipchuk M.I., Balakirev A.N., Dmitrieva L.V., Zalaev G.Z. *Rekomendatsii po obespecheniyu sokhrannosti informatsii, zapisannoy na opticheskikh diskakh (Testirovanie vyborochnogo massiva dokumentov federal'nykh arkhivov)* [Recommendations to ensure the safety of information recorded on optical discs (Testing of a sample array of Federal archives documents)]. Moscow: RGANDT, 2011, 52 p.
- [16] Chernyshov A.V. *Otsenka veroyatnosti vykhoda iz stroya opticheskogo diska DVD-R s zapis'yu po rezul'tatam naturnogo eksperimenta* [Evaluation of the probability of failure of the optical disc DVD-R with recording on the results of full-scale experiment] *Sovremennye tekhnologii v zadachakh upravleniya, avtomatiki i obrabotki informatsii: Sbornik trudov XXVII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Modern technologies in control, automation and information processing: proceedings of the XXVII International scientific and technical conference]. Alushta, September 14–20 2018. Tambov: TSTU, 2018, p. 272.
- [17] Gold Archive DVD-R / + R. URL: <http://www.mam-a-store.com/golddvd.html> (accessed 03.03.2019).
- [18] *CD-R nositeli* [CD-R discs]. Available at: <https://www.ixbt.com/storage/cdr.shtml> (accessed 03.03.2019).
- [19] *Verbatim: Tekhnologii izgotovleniya* [Verbatim: Manufacturing techniques]. Available at: <https://www.verbatim.ru/ru/article/core-technologies/> (accessed 03.03.2019).
- [20] Venttsel' E. S., Ovcharov L. A. *Teoriya veroyatnostey i ee inzhenernye prilozheniya* [Theory of Probability and its Engineering Applications]. Moscow: Nauka [Science], 1988, 480 p.

Author's information

Chernyshov Aleksandr Viktorovich — Cand. Sci. (Tech.), Associated Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), sch-ru@yandex.ru

Received 19.04.2019.

Accepted for publication 15.07.2019.

УДК 681.5:681.3

DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-88-97

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИЛЬНОГО СЛЕДЯЩЕГО АНСЦЕНТНОГО ФИЛЬТРА КАЛМАНА С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЧЕТКОЙ МОДЕЛИ

Н.П. Деменков, Чан Динь Минь

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 107005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1

dnr@bmstu.ru

Для обеспечения лучшей гладкости оценки состояния в сильном следящем фильтре Калмана предлагается ввести субоптимальный коэффициент затухания, в котором задействован коэффициент смягчения, а для повышения устойчивости фильтра Калмана к неопределенности модели процесса в сильный следящий ансцентный фильтр Калмана, разработанный на основе комбинации ансцентного фильтра Калмана и сильного следящего фильтра Калмана, добавить фактор смягчения. Представлена зависимость матрицы субоптимального коэффициента затухания от трех параметров: априорного коэффициента, коэффициента забывания и коэффициента смягчения. Охарактеризован добавленный фактор смягчения, используемый для улучшения гладкости оценки состояния: чем он больше, тем точнее оценка, а чем меньше значение, тем выше способность отслеживания. В традиционном сильном следящем ансцентном фильтре Калмана коэффициент смягчения определен эмпирически и включен в весь процесс фильтрации, что приводит к потере точности во временных сегментах определения модели процесса. Рекомендуется вариант применения нечеткой модели Такаги — Сугено для настройки в режиме реального времени коэффициента смягчения при изменении динамики объекта. В результате сравнительного анализа точности исследуемых фильтров применительно к нелинейной модели установлено, что фильтр с нечеткой логической адаптивной системой обладает хорошей гладкостью оценки и наибольшей точностью.

Ключевые слова: сильный следящий ансцентный фильтр Калмана, субоптимальный коэффициент затухания, коэффициент смягчения, нечеткий фильтр, T — S -модель

Ссылка для цитирования: Деменков Н.П., Чан Динь Минь. Оценка эффективности сильного следящего ансцентного фильтра Калмана с применением нечеткой модели // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2019. Т. 23. № 4. С. 88–97. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-88-97

Одним из наиболее распространенных подходов к оценке состояния в нелинейных динамических системах является фильтр Калмана (англ. Kalman Filter) и его разновидности (далее по тексту — ФК). К слаболинейным системам применяется расширенный ФК (Extended) через линеаризацию, однако имеющий два недостатка: 1) необходимость вычисления якобиевых матриц; 2) крайне неточную линеаризованную аппроксимацию, — которые могут приводить к нестабильности фильтра [1–5].

Для исключения недостатков предложен ансцентный ФК (Unscented) [6–8]. Он использует набор сигма-точек посредством детерминированной выборки, что позволяет избежать ошибок, вызванных линеаризацией, как в традиционном расширенном ФК. Однако ансцентный как и расширенный ФК, чувствителен к неопределенности модели системы. При наличии неопределенности модели входные данные не могут отражать реальную модель, и фильтрующее решение ансцентного ФК будет ухудшаться или даже расходиться [6].

Сильный следящий ФК (Strong Tracking) представляет собой, по существу, нелинейный более плавный алгоритм, который использует субоптимальные множители затухания, в которых задействован коэффициент смягчения [9–11]. Он имеет несколько достоинств, в частности сильную устойчивость к неопределенности модели и хорошую способность отслеживания состояния

в реальном времени, даже когда происходит скачок состояния, независимо от того, достигла ли система устойчивого состояния, а также среднюю вычислительную нагрузку.

Сильный следящий ансцентный ФК (Strong Tracking Unscented) разработан на основе комбинации ансцентного и сильного следящего ФК, ключевым параметром которого стала матрица субоптимального коэффициента затухания, зависящая от коэффициентов: априорного, затухания и смягчения. Коэффициент смягчения β используется для улучшения гладкости оценки состояния. Чем больше β , тем лучше точность оценки. Меньшее значение β обеспечивает более высокую способность отслеживания [12, 13].

Традиционный подход сильного следящего ансцентного ФК для определения факторов смягчения в значительной степени зависит от личного опыта или компьютерного моделирования с использованием схемы эвристического поиска. Субоптимальный коэффициент затухания включен в весь процесс фильтрации, что приводит к потере точности во временных сегментах определения модели процесса.

Модель процесса фильтрации зависит от динамических характеристик системы, в том числе неопределенных факторов. Когда проектировщик не владеет достаточной информацией для разработки полной модели или параметры изменяются со временем, может произойти расхождение

в процессе фильтрации. Увеличение размерности вектора состояния и связанных с ним матриц приводит к большой вычислительной нагрузке.

Цель работы

Цель настоящих исследований — применение нечеткой модели для настройки в режиме реального времени коэффициента смягчения при изменении динамики объекта и сравнительном анализе точности исследуемых фильтров для нелинейной модели.

Алгоритмы исследуемых фильтров

Рассмотрим дискретную нелинейную модель динамической системы вида

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= f(x_k, t) + w_k, \\ z_k &= h(x_k, t) + v_k, \end{aligned} \quad (1)$$

где x — вектор состояния размерностью $(n \times 1)$; w — шум процесса $(n \times 1)$; z — вектор измерения $(m \times 1)$; v — шум измерения $(m \times 1)$; w и v имеют нулевое математическое ожидание и соответственно ковариационные матрицы Q_k и R_k .

Требуется в каждый момент времени по результатам всех имеющихся к этому моменту измерений z получить вектор оценки \hat{x} и вектор состояния процесса x с использованием исследуемых фильтров.

Для наглядной демонстрации улучшений, полученных в результате применения предлагаемого метода по сравнению с ансцентным и сильным следящим ансцентным ФК, кратко рассмотрим их концепции.

Алгоритм ансцентного фильтра Калмана.

В ансцентном ФК распределение состояний аппроксимируется гауссовой случайной величиной (ГСВ), которая затем распространяется аналитически через линеаризацию первого порядка нелинейной системы. Исследования показали, что это приведет к большим ошибкам в истинном среднем значении и ковариации трансформированной ГСВ, к неоптимальной производительности, а иногда и к расхождению. Эта проблема решается с помощью ансцентного ФК, при использовании детерминистического подхода к выборке для получения средних значений и ковариационных оценок с минимальным набором точек выборки. Распределение состояний также аппроксимируется ГСВ, но представлено с использованием минимального набора точек выборки, которые тщательно выбирают так, чтобы полностью охватить истинное среднее значение и ковариацию ГСВ. Когда точки выборки распространяются через истинную нелинейную систему, последующие среднее значение и ковариация могут быть точно зафиксированы до 3-го порядка разложения в ряд Тейлора для любой нелинейной системы.

В реализации ансцентного ФК вектор состояния обычно определяется как комбинация состояния и шумовых переменных системы, т. е. $x_k = [x_k, w_k, v_k]^T$. Первым шагом в алгоритме ансцентного ФК является выборка предыдущего распределения состояний, т. е. генерирование сигма-точек посредством ансцентного преобразования (УТ-преобразования). Набор взвешенных выборок, или сигма-точек, детерминированно выбирается таким образом, чтобы они полностью отражали истинное среднее значение и ковариацию случайной величины. Выборки распространяются через истинные нелинейные уравнения, и нет необходимости в линеаризации модели. Для расчета статистики нужны $2n + 1$ сигма-точек, где n — размерность состояния.

Опишем алгоритм ансцентного ФК для нелинейной системы, заданной формулой (1) [7].

Шаг 1. Определение сигма-точек с помощью оценки состояния \hat{x}_{k-1} , ковариационной матрицы ошибок P_{k-1} и взвешенных коэффициентов.

Воспользуемся следующими выражениями:

$$\zeta_{i,k-1} = \hat{x}_{k-1}, \quad i = 0;$$

$$\zeta_{i,k-1} = \hat{x}_{k-1} + \left(\sqrt{(n+\lambda)P_{k-1}} \right)_i^T, \quad i = 1, 2, \dots, n;$$

$$\zeta_{i,k-1} = \hat{x}_{k-1} - \left(\sqrt{(n+\lambda)P_{k-1}} \right)_i^T, \quad i = n+1, n+2, \dots, 2n;$$

$$w_0^{(m)} = \frac{\lambda}{n+\lambda}; \quad w_0^{(c)} = \frac{\lambda}{n+\lambda} + (1 - \alpha^2 + \delta);$$

$$w_i^{(m)} = w_i^{(c)} = \frac{\lambda}{2(n+\lambda)}, \quad i = 1, 2, \dots, 2n,$$

где $\sqrt{(n+\lambda)P_{k-1}}$ — i -я строка матрицы квадратного корня, полученной из нижнетреугольной матрицы факторизации Cholesky; $\lambda = \alpha^2(n+k)$ — n -параметр масштабирования; α — распространение сигма-точек вокруг x (обычно устанавливается на небольшое положительное значение, например, 10^{-3}); k — вторичный параметр масштабирования (обычно равен 0); δ — предварительное знание распределения \bar{x} (для гауссовских распределений $\delta = 2$ является оптимальным).

Шаг 2. Предсказание с помощью УТ-преобразования.

Сигма-векторы распространяются через нелинейную функцию для получения набора преобразованных сигма-точек $\zeta_{k/k-1} = f(\zeta_{k-1})$.

Вычислим среднее значение и прогноз ковариации преобразованных сигма-точек

$$\hat{z}_k^- = \sum_{i=0}^{2n} w_i^{(m)} \gamma_{i,k/k-1};$$

$$P_{x_k}^- = \sum_{i=0}^{2n} w_i^{(c)} (\zeta_{i,k/k-1} - \hat{x}_k^-) (\zeta_{i,k/k-1} - \hat{x}_k^-)^T + Q_k. \quad (2)$$

Набор сигма-точек для измерения определяется из равенства $\gamma_{k/k-1} = h(\zeta_{k/k-1})$.

Среднее значение и ковариация предсказанных измерений вычисляются как

$$\hat{z}_k^- = \sum_{i=0}^{2n} w_i^{(m)} \gamma_{i,k/k-1};$$

$$P_{z_k} = \sum_{i=0}^{2n} w_i^{(c)} (\gamma_{i,k/k-1} - \hat{z}_k^-) (\gamma_{i,k/k-1} - \hat{z}_k^-)^T + R_k. \quad (3)$$

Шаг 3. Обновление.

Определим кросс-ковариацию P_{xz} между предсказанными состояниями и измерениями

$$P_{xz} = \sum_{i=0}^{2n} w_i^{(c)} (\zeta_{i,k/k-1} - \hat{x}_k^-) (\gamma_{i,k/k-1} - \hat{z}_k^-)^T, \quad (4)$$

и коэффициент усиления

$$K_k = P_{xz} P_{z_k}^{-1}.$$

Оценка состояния \hat{x}_k и ковариационная матрица ошибок P_{x_k} обновляются таким образом:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - \hat{z}_k^-);$$

$$P_{x_k} = P_{x_k}^{-1} - K_k P_{z_k} K_k^T.$$

Реализация ансцентного ФК часто существенно проще: линеаризация не нужна, нет необходимости в вычислении аналитических якобиевых матриц. К тому же ансцентный ФК — превосходный стандартный расширенный ФК для оценок нелинейного состояния и параметров (идентификации) системы. Ансцентный ФК достигает точности оценки до второго порядка, в то время как расширенный ФК является только приближением первого порядка. Однако, как и расширенный ФК, ансцентный ФК чувствителен к неопределенности модели системы, при наличии которой входные данные не могут отражать реальную модель и фильтрация будет ухудшаться или даже расходиться.

Алгоритм сильного следящего ансцентного фильтра. Нелинейным более гладким алгоритмом, по существу, является сильный следящий ФК. В нем для обеспечения лучшей гладкости оценки состояния вводится субоптимальный коэффициент затухания (Suboptimal Fading Factor), в котором задействован коэффициент смягчения β .

Сильный следящий ансцентный ФК разработан, как было указано выше, на основе комбинации ансцентного ФК и сильного следящего ФК. Для повышения устойчивости ансцентного ФК к неопределенности модели процесса в ансцентный ФК непосредственно добавлен коэффициент смягчения, используемый в сильном следящем ФК [10–13].

Матрица субоптимального коэффициента затухания λ_k определяется следующим образом

$$\lambda_{i,k} = \begin{cases} \alpha_i c_k, & \alpha_i c_k > 1, \\ 1, & \alpha_i c_k \leq 1 \end{cases} \quad \lambda_k = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m), \quad (5)$$

где

$$c_k = \frac{\text{tr}[N_k]}{\text{tr}[\alpha M_k]};$$

$$N_k = V_k - \beta R_k - H_k Q_k H_k^T;$$

$$M_k = H_k A_k P_k A_k^T H_k^T;$$

$$V_k = \begin{cases} v_0 v_0^T, & k = 1, \\ \frac{[\rho V_{k-1} + v_k v_k^T]}{1 + \rho}, & k \geq 2 \end{cases} \quad v_k = z_k - \hat{z}_k^-.$$

Здесь α_i — априорный коэффициент ($\alpha_i \geq 1$), ρ — коэффициент затухания ($0 \leq \rho \leq 1$), β — коэффициент смягчения ($1 \leq \beta \leq 5$).

Алгоритм сильного следящего ансцентного ФК аналогичен алгоритму ансцентного ФК со следующими изменениями. Ковариационную матрицу необходимо обновить, т. е. новые значения $P_{x_k}^-$, P_{z_k} , P_{xz} нуждаются в модификации, а получить их можно путем умножения соотношений (2), (3) и (4) на коэффициент λ_k (5):

$$P_{x_k}^- = \lambda_k \left\{ \sum_{i=0}^{2n} w_i^{(c)} (\zeta_{i,k/k-1} - \hat{x}_k^-) (\zeta_{i,k/k-1} - \hat{x}_k^-)^T + Q_k \right\}; \quad (6)$$

$$P_{z_k} = \lambda_k \left\{ \sum_{i=0}^{2n} w_i^{(c)} (\gamma_{i,k/k-1} - \hat{z}_k^-) (\gamma_{i,k/k-1} - \hat{z}_k^-)^T + R_k \right\}; \quad (7)$$

$$P_{xz} = \lambda_k \left\{ \sum_{i=0}^{2n} w_i^{(c)} (\zeta_{i,k/k-1} - \hat{x}_k^-) (\gamma_{i,k/k-1} - \hat{z}_k^-)^T \right\}. \quad (8)$$

В традиционном сильном следящем ансцентном ФК априорный коэффициент α , коэффициент затухания ρ и коэффициент смягчения β , входящие в матрицу субоптимального коэффициента затухания λ_k , выбираются эмпирически. Субоптимальный коэффициент затухания включен в весь процесс фильтрации, что приводит к потере точности во временных сегментах определения модели процесса. При изменении динамики объекта необходимо получить коэффициент смягчения в режиме реального времени для обеспечения эффективности фильтрации к вариациям параметров системы. Рациональным подходом видится применение нечеткой модели.

Применение нечеткой логической адаптивной системы (НЛАС) с нечеткими правилами позволяет в режиме реального времени настраивать коэффициент смягчения при изменении динамики объекта. Такая схема может адаптировать коэффициент затухания и, следовательно, повышает производительность оценки. Алгоритм сильного следящего ансцентного ФК с применением нечеткой модели дает многообещающие результаты как в отношении точности, так и возможности отслеживания.

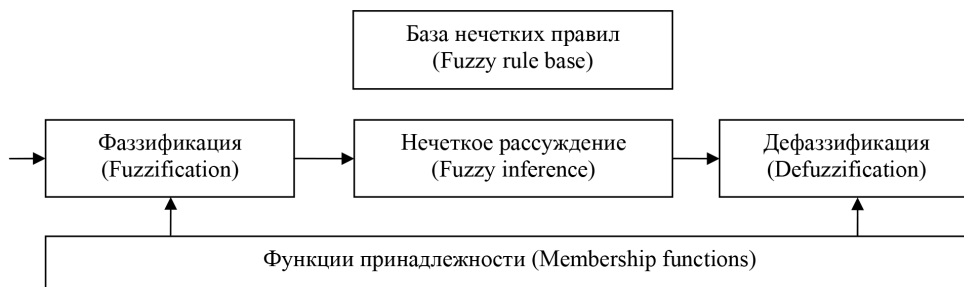


Рис. 1. Типичная нечеткая система
Fig. 1. Typical fuzzy system

Алгоритм сильного следящего ансцентного фильтра с применением нечеткой модели. Типичная нечеткая система состоит из таких компонентов [14, 21], как фаззификация, нечеткое рассуждение (нечеткий вывод) и дефаззификация (рис. 1).

Процесс фаззификации преобразует четкое входное значение в нечеткое значение, нечеткий вывод отвечает за изъятие вычислений из базы правил, а нечеткий процесс дефаззификации превращает нечеткие действия в четкие.

В настоящей статье используется нечеткая система Такаги — Сугено (*T—S*-модель), типичное правило которой имеет вид [15–20]:

ЕСЛИ вход $x_1 = F_1^1$ и вход $x_2 = F_2^1$ и ... и вход $x_n = F_n^1$,
ТО ВЫХОД $y_k = f_k(x_1, x_2, \dots, x_n) = C_{k_0} + C_{k_1}x_1 + C_{k_2}x_2 + \dots + C_{k_n}x_n$,

где $F_1^1, F_2^1, \dots, F_n^1$ — нечеткие множества,
 $C_{k_0} + C_{k_1}x_1 + C_{k_2}x_2 + \dots + C_{k_n}$ — константы.

Коэффициент смягчения β в сильном следящем ансцентном ФК имеет постоянное значение и не изменяется несмотря на изменение динамики системы. В нечетком сильном следящем ансцентном ФК β определяется с помощью нечеткой логической адаптивной системы (рис. 2), входами которой являются степень расхождения μ и следы ковариационной матрицы обновления ξ

$$\mu = \frac{v_k^T v_k}{m}, \quad \xi = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |v_i|,$$

где $v_k = [v_1 v_2 \dots v_n]^T$, m — количество измерительных устройств.

Степень расхождения μ , определяемую как усредненную величину обновления в данном периоде, можно использовать для своевременного отражения изменяющейся во времени динамики системы.

Контролируя параметры μ , нечеткая логическая адаптивная система может оперативно настраивать коэффициент смягчения β в соответствии с нечеткими правилами. Впоследствии эта схема может адаптивно корректировать коэффициент затухания λ_k , причем повышается эффективность оценки. При уменьшении коэффи-

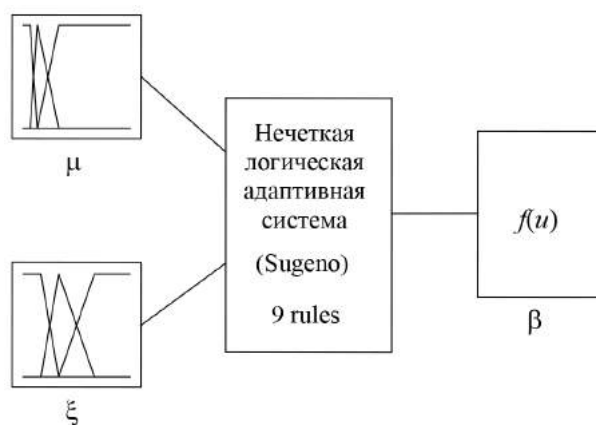


Рис. 2. Структура нечеткой логической адаптивной системы
Fig. 2. The structure of the fuzzy logical adaptive system

циента смягчения улучшается отслеживаемость сильного следящего ансцентного ФК, при его увеличении улучшается точность оценки. Нечеткая логическая адаптивная система используется для настройки коэффициента смягчения в соответствии с информацией обновления, что приводит к общему повышению производительности как с точки зрения возможности отслеживания, так и точности оценки.

Представляем описание алгоритма (рис. 3) сильного следящего ансцентного ФК с нечеткой логической адаптивной системой для нелинейной системы, заданной формулой (1):

Шаг 1. Инициализация \hat{x}_0 и P_0^- .

Шаг 2. Определение сигма-точек с помощью оценки состояния \hat{x}_{k-1} , ковариационной матрицы ошибок P_{k-1} и взвешенных коэффициентов.

Шаг 3. Вычисление среднего значения оценки и среднего значения измерений с помощью УТ-преобразования.

Шаг 4. Определение коэффициента смягчения β с помощью НЛАС.

Шаг 5. Определение субоптимального коэффициента масштабирования λ_k .

Шаг 6. Определение ковариационных матриц $P_{x_k}^-, P_{z_k}^-, P_{xz}$ (6)–(8).

Шаг 7. Корректировка матрицы усиления, текущей оценки и матрицы ковариации ошибок.

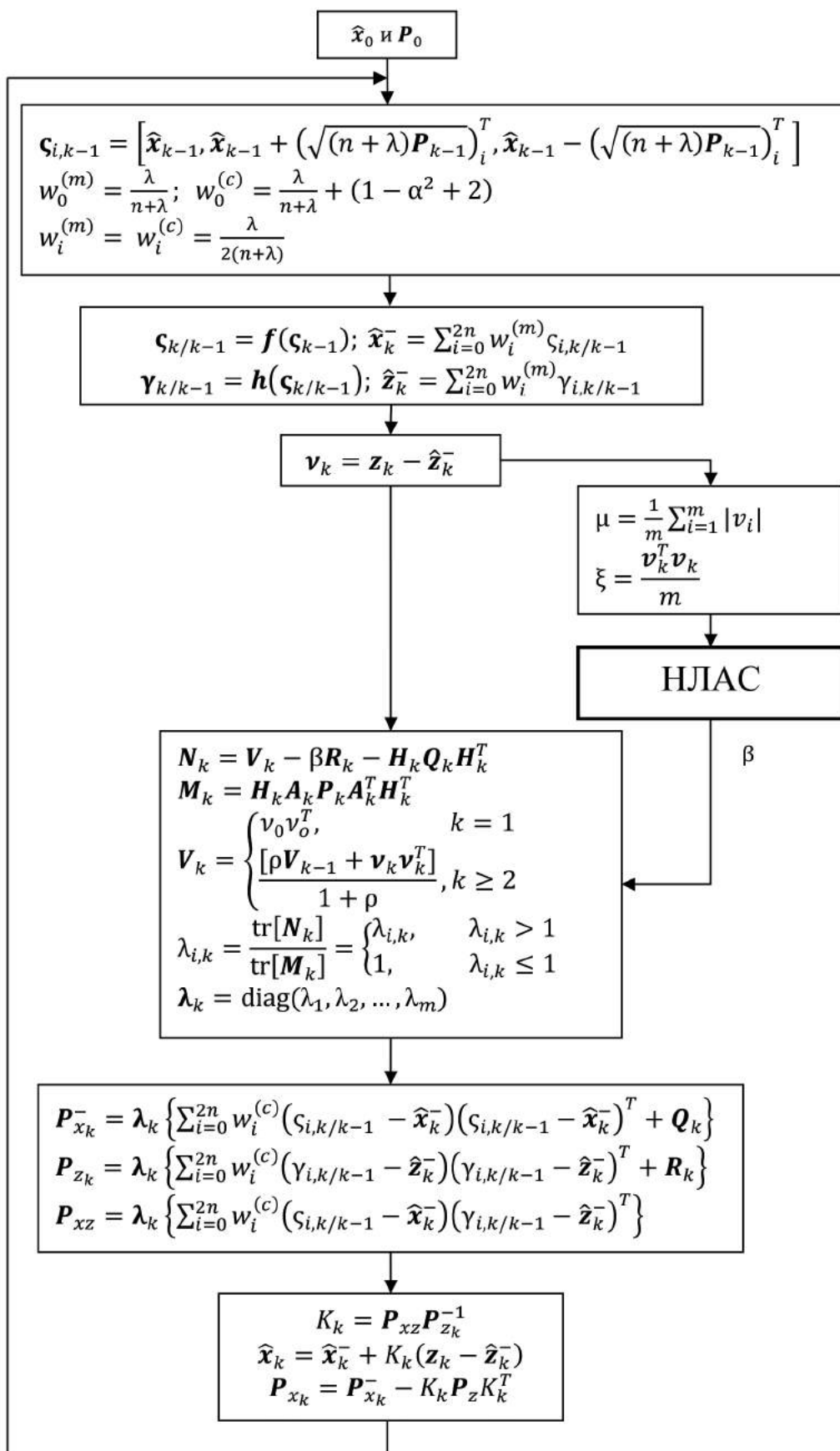


Рис. 3. Алгоритм сильного следящего ансцентного фильтра Калмана с применением нечеткой модели
 Fig. 3. Algorithm of a strong tracking Kalman filter with the use of a fuzzy model

Сравнительный анализ точности оценки различными фильтрами

Реализация нечеткой логической адаптивной системы. Для реализации применяется пакет прикладных программ MATLAB с FUZZY TOOLBOX для построения функции нечеткой логики.

Основная идея определения базы нечетких правил системы нечеткой логической адаптивной системы заключается в следующем:

Для случая, когда параметр расхождения μ невелик, необходимо получить результаты с лучшей точностью оценки, применяя больший коэффициент смягчения β .

Для случая, когда параметр μ увеличен, необходимо увеличить возможности отслеживания, применяя меньший коэффициент смягчения β .

$T-S$ модель первого порядка для нечеткой логической адаптивной системы имеет два входа (μ и ξ), один выход (β) со следующими правилами:

ЕСЛИ μ — нуль (zero) и ξ — нуль (zero),
ТО $\beta = 3\mu + 3\xi + 5$ (9);

ЕСЛИ μ — нуль (zero) и ξ — маленький (small), ТО $\beta = 3\mu + 2\xi + 4$;

ЕСЛИ μ — нуль (zero) и ξ — большой (large), ТО $\beta = \mu + \xi + 3$;

ЕСЛИ μ — маленький (small) и ξ — zero, ТО $\beta = \mu + 3\xi + 2$;

ЕСЛИ μ — маленький (small) и ξ — маленький (small), ТО $\beta = \mu + 2\xi + 2$;

ЕСЛИ μ — маленький (small) и ξ — большой (large), ТО $\beta = \mu + \xi + 2$;

ЕСЛИ μ — большой (large) и ξ — нуль (zero), ТО $\beta = \xi + 1$;

ЕСЛИ μ — большой (large) и ξ — маленький (small), ТО $\beta = 1$;

ЕСЛИ μ — большой (large) и ξ — большой (large), ТО $\beta = 1$.

В процессе фазификации входных данных использовались имеющиеся в библиотеке пакета MATLAB гауссовские функции принадлежности (рис. 4). По оси абсцисс отложены значения параметра расхождения μ , а по оси ординат — их степень принадлежности, за которую принимается значение от 0...1.

Известны различные методы дефазификации: метод центра тяжести (Center of gravity — COG); метод последнего максимума (Last of Maxima Method — LOM); метод медианы (Bisector of Area Method — BOA); метод среднего значения максимума (Mean of Maxima Method — MOM) [21]. В настоящей работе используется метод центра тяжести.

На рис. 5 представлена зависимость коэффициента смягчения $\beta(\mu, \xi)$ от динамики системы на основе вышеуказанных нечетких правил (9) с методом дефазификации COG.

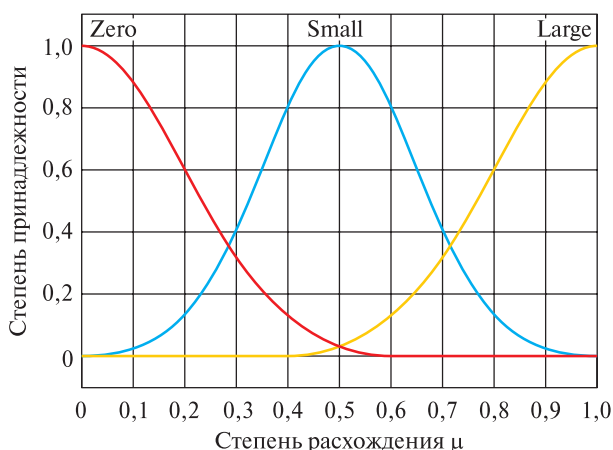


Рис. 4. Функции принадлежности параметра расхождения μ
Fig. 4. Membership functions of the divergence parameter μ

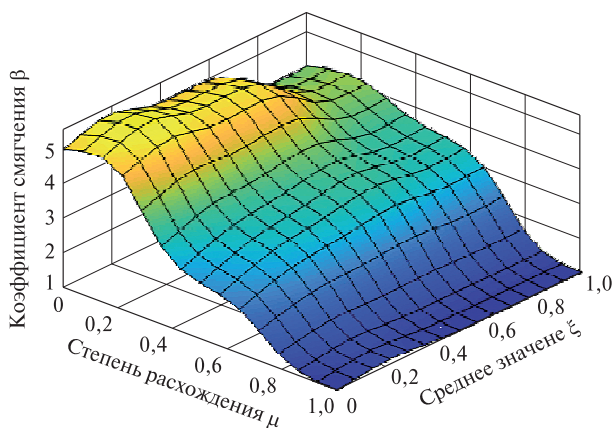


Рис. 5. Моделирование нечеткой логической адаптивной системы
Fig. 5. Modeling a fuzzy logical adaptive system

Коэффициент смягчения β , определяемый с помощью нечеткой логической адаптивной системы, плавно изменяется с изменением динамики системы. Когда коэффициент β меньше, способность отслеживания нечеткого фильтра сильного следящего ансцентного ФК лучше, когда коэффициент смягчения больше, его точность отслеживания еще более улучшается.

Сравнительный анализ точности оценки различными фильтрами. В качестве примера рассмотрим следующую нелинейную систему

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = f(x) = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_3 \\ 0,03x_1(x_2 + x_3) \end{bmatrix} + w(t),$$

$$z = f(x) = x_1 + v(t).$$

Начальные условия: $x_0 = [0; 0; 1]$, $P_0 = \text{diag}[1, 1, 1]$, время моделирования $t = [0, 100]$ с. Заданы ковариационные матрицы Q_k и R_k шумов процесса и измерения: $Q_1 = \text{diag}[0,01, 0,01, 0,01]$, $R_1 = 0,01$.

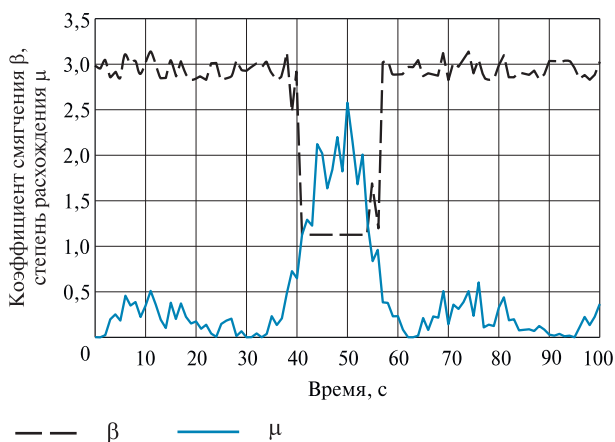


Рис. 6. Изменение коэффициента смягчения и степени расхождения во времени
Fig. 6. Change in mitigation coefficient and degree of discrepancy in time

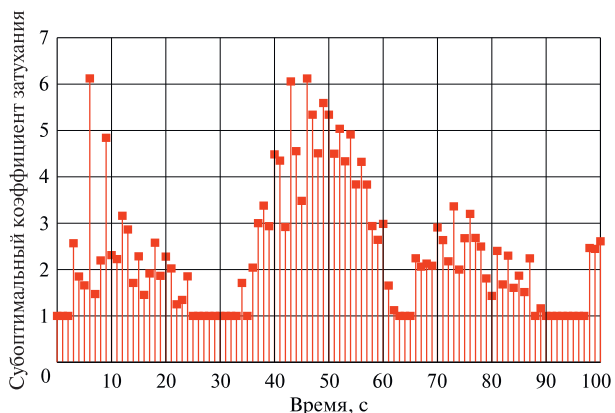


Рис. 7. Изменение субоптимального коэффициента затухания во времени
Fig. 7. Change in suboptimal attenuation coefficient over time

Среднеквадратическое отклонение точности оценки фильтров

Standard deviation of filter estimation accuracy

Коэффициент смягчения β	Среднеквадратическое отклонение σ		
	x_1	x_2	x_3
2	0,0781	0,0768	0,0903
5	0,0610	0,0602	0,0695
Определяемый с помощью НЛАС	0,0636	0,0629	0,0716

Моделирование проводилось с различными коэффициентами смягчения: $\beta_1 = 2$, $\beta_2 = 5$ и β_3 , определяемым с помощью нечеткой логической адаптивной системы.

На рис. 6 представлено изменение коэффициента смягчения и степени расхождения во времени. Видно, что коэффициент смягчения меняется

при изменении степени расхождения по нечетким правилам, т. е. он регулируется по динамике системы. Это позволяет настроить матрицу субоптимального коэффициента затухания в режиме реального времени (рис. 7).

На рис. 7 представлено изменение коэффициента смягчения β и параметра расхождения μ во времени: β меняется с изменением μ по нечетким правилам.

Для сравнения точности оценки указанных фильтров используется параметр среднеквадратического отклонения σ (таблица):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2},$$

где \hat{x}_i — оценка состояния; x_i — его фактическое значение; N — количество наблюдений.

Сильный следящий ансцентный ФК с большим значением коэффициента смягчения $\beta = 5$ обеспечивает хорошую точность, с меньшим значением коэффициента смягчения $\beta = 2$ — лучшую отслеживаемость, а с применением нечеткой логической адаптивной системы обладает хорошими свойствами для этих обоих случаев, т. е. как для возможности отслеживания, так и для точности оценки.

Выводы

1. В ходе проведенных исследований предложен алгоритм сильного следящего ансцентного ФК с применением нечеткой модели Такаги — Сугено ($T-S$ -модель) для настройки в режиме реального времени коэффициента смягчения при изменении динамики объекта.

2. В результате сравнительного анализа точности исследуемых фильтров относительно нелинейной модели установлено, что сильный следящий ансцентный ФК с применением нечеткой логической адаптивной системы обладает хорошей гладкостью оценки и наибольшей точностью.

Список литературы

[1] Куликов Р.С. Сравнение точностей нелинейной фильтрации в расширенном фильтре Калмана и в ансцентном фильтре // Радиотехника, 2016. № 9. С. 135–140.
 [2] Кудрявцева И.А. Анализ эффективности расширенного фильтра Калмана, сигма-точечного фильтра Калмана и сигма-точечного фильтра частиц // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации, 2016. № 224 (2). С. 43–51.
 [3] Дмитриев С.П., Степанов О.А., Шепель С.В. Применение методов нелинейной фильтрации в калибровке ИНС // IEEE Труды. Аэрокосмические и электронные системы, 1997. Вып. 33 (1). С. 260–271.
 [4] Дегтярев А.А., Тайль Ш. Элементы теории адаптивного фильтра Калмана. М.: Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 2003. 35 с.
 [5] Sage A.P., Melse J.L. Estimation theory with application to communication and control. N.Y.: McGraw-Hill, 1972. 496 p.

- [6] Merwe R.V.D. Sigma-point Kalman filters for probabilistic inference in dynamic state-space models. Ph.D thesis, OGI school of science & engineering at Oregon Health & Science Uni, 2004.
- [7] Julier S.J., Uhlmann J.K. Unscented filtering and nonlinear estimation // Proc. of IEEE, 2004, v. 3, pp. 401–422.
- [8] Sudheesh P., Jayakumar M. Nonlinear tracking using unscented // Advances in Intelligent Systems and Computing, 2018, v. 678, pp. 38–46.
- [9] Zhang Z., Zhang J. A strong tracking nonlinear robust filter for eye tracking // J. Control Theory Appl, 2010, v. 8(4), pp. 503–508.
- [10] Zhou H., Frank P. M. Strong tracking filtering of nonlinear time-varying stochastic systems with coloured noise // Application to parameter estimation and empirical robustness analysis, International Journal of Control, 1996, v. 65 (2), pp. 295–307.
- [11] Feng Y., Li X., Zhang X. An Adaptive Compensation Algorithm for Temperature Drift of Micro-Electro-Mechanical Systems Gyroscopes Using a Strong Tracking Kalman Filter // Sensors, 2015, v. 15, pp. 11222–11238.
- [12] Narasimhappa1 M., Sabat S.L., Nayak J. Adaptive sampling strong tracking scaled unscented Kalman filter for denoising the fibre optic gyroscope drift signal // IET Science, Measurement & Technology, 2015, v. 9, iss. 3, pp. 241–249.
- [13] Jwo D.J., Lai S.Y. Navigation integration using the fuzzy strong tracking unscented Kalman // Journal of Navigation, 2009, v. 62, pp. 303–322.
- [14] Деменков Н.П. Нечеткое управление в технических системах. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 200 с.
- [15] Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1985, v. 15(1), pp. 116–132.
- [16] Barragán, A.J., Al-Hadithi, B.M., Jiménez, A., Andújar, J.M. A general methodology for online TS fuzzy modeling by the extended Kalman filter // Applied Soft Computing, 2014, v. 18, pp. 277–289.
- [17] Jwo D.J., Wang S.H. Adaptive fuzzy strong tracking extended Kalman filtering for GPS navigation // IEEE Sensors, 2007, v. 7(5–6), pp. 778–789.
- [18] Arghavani N., Almobaied M., Guzelkaya M., Eksin I. On-line rule weighting for PID-type fuzzy logic controllers using extended Kalman filter // IFAC-Papers OnLine, 2017, v. 50, iss. 1, pp. 6946–6951.
- [19] Sasiadek J.Z., Wang Q., Zeremba M.B. Fuzzy adaptive Kalman filtering for INS/GPS data fusion // Proc. 15th IEEE Int. Symp. on Intelligent Control, Rio, Patras, Greece, 2000, pp. 181–186.
- [20] Chien-Hao Tseng, Chih-Wen Chang and Dah-Jing Jwo. Fuzzy adaptive interacting multiple model nonlinear filter for integrated navigation sensor fusion // Sensors, 2011, v. 11, pp. 2090–2111.
- [21] Пигат А. Нечеткое моделирование и управление. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. 798 с.

Сведения об авторах

Деменков Николай Петрович — канд. техн. наук, доцент кафедры систем автоматического управления МГТУ им. Н.Э. Баумана, dnp@bmstu.ru.

Чан Динь Минь — аспирант кафедры систем автоматического управления МГТУ им. Н.Э. Баумана, ruxi.tran@gmail.com.

Поступила в редакцию 19.04.2019.

Принята к публикации 15.07.2019.

ESTIMATE OF STRONG TRACKING UNSCENTED KALMAN FILTER EFFICIENCY USING A FUZZY MODEL

N.P. Demenkov, Chan Din' Min'

BMSTU, 5, 2nd Baumanskaya st., 107005, Moscow, Russia

dnp@bmstu.ru

Unscented Kalman Filter (UKF) using a set of sigma points by means of deterministic sampling, makes it possible to avoid errors caused by linearization, as in the traditional Extended Kalman filter (EKF). However, like the EKF filter, the UKF filter is sensitive to the uncertainty of the system model. In the presence of model uncertainty, the input data cannot reflect the real model and filtering will deteriorate or even diverge. In a Strong Tracking Kalman Filter (STKF), in order to provide better smoothness of state estimation, a suboptimal fading factor is introduced, in which the softening coefficient is used. In Strong Tracking Unscented Kalman Filter (STUKF), developed based on the combination of the UKF and STKF, to increase the stability of the UKF, the softening factor used in the STKF on the UKF is directly added to the uncertainty of the process model. The key parameter in the STUKF is the matrix of the suboptimal fading factor, which depends on three parameters: a priori coefficient; forgetting coefficient and softening factor. The softening factor is used to improve the smoothness of the state assessment. The larger it is, the better the accuracy of the estimate, and the lower the value, the higher the tracking ability. In the traditional STUKF, the softening coefficient is determined empirically and is included in the entire filtering process, which leads to a loss of accuracy in the time segments in which the process model is defined. In this paper, we consider the option of applying the Takagi — Sugeno fuzzy model ($T — S$ -model) to adjust the online softening coefficient when the object dynamics changes. As a result of a comparative analysis of the accuracy of the studied filters to the nonlinear model, it was found that the STUKF using a fuzzy logical adaptive system has a good smoothness of evaluation and the greatest accuracy.

Keywords: strong tracking unscented Kalman filter, suboptimal fading factor, softening coefficient, fuzzy filter, $T — S$ -model

Suggested citation: Demenkov N.P., Chan Din' Min' *Otsenka effektivnosti sil'nogo sledyashchego anstsentnogo fil'tra Kalmana s primeneniem nechetkoy modeli* [Estimate of strong tracking unscented Kalman Filter efficiency using a fuzzy model]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 4, pp. 88–97. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-88-97

References

- [1] Kulikov R.S. *Sravnenie tochnostey nelineynoy fil'tratsii v rasshirennom fil'tre Kalmana i v anstsentnom fil'tre* [Comparison of the accuracy of nonlinear filtering in the expanded Kalman filter and in the extension filter] *Radiotekhnika*, 2016, no. 9, pp. 135–140.
- [2] Kudryavtseva I.A. *Analiz effektivnosti rasshirennogo fil'tra Kalmana, sigma-tochechnogo fil'tra Kalmana i sigma-tochechnogo fil'tra chastits* [Analysis of the effectiveness of the extended Kalman filter, Kalman sigma point filter and sigma point particle filter] *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoy aviatsii* [Scientific Herald of the Moscow State Technical University of Civil Aviation], 2016, no. 224 (2), pp. 43–51.
- [3] Dmitriev S.P., Stepanov O.A., Shepel' S.V. *Primenenie metodov nelineynoy fil'tratsii v kalibrovke INS* [Application of nonlinear filtering methods in INS calibration] *IEEE Proc. Aerospace and electronic systems*, 1997, v. 33 (1), pp. 260–271.
- [4] Degtyarev A.A., Tayl S. *Elements of the theory of the adaptive Kalman filter*. M.: Institute of Applied Mathematics. Mv Keldysh RAS, 2003. 35 p.
- [5] Sage A.P., Melse J.L. *Estimation theory with application to communication and control*. N.Y.: McGraw-Hill, 1972. 496 p.
- [6] Merwe R.V.D. *Sigma-point Kalman filters for probabilistic inference in dynamic state-space models*. Ph.D thesis, OGI school of science & engineering at Oregon Health & Science Uni, 2004.
- [7] Julier S.J., Uhlmann J.K. *Unscented filtering and nonlinear estimation* // *Proc. of IEEE*, 2004, v. 3, pp. 401–422.
- [8] Sudheesh P., Jayakumar M. *Nonlinear tracking using unscented* // *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2018, v. 678, pp. 38–46.
- [9] Zhang Z., Zhang J. *A strong tracking nonlinear robust filter for eye tracking* // *J. Control Theory Appl*, 2010, v. 8(4), pp. 503–508.
- [10] Zhou H., Frank P. M. *Strong tracking filtering of nonlinear time-varying stochastic systems with coloured noise* // *Application to parameter estimation and empirical robustness analysis*, *International Journal of Control*, 1996, v. 65 (2), pp. 295–307.
- [11] Feng Y., Li X., Zhang X. *An Adaptive Compensation Algorithm for Temperature Drift of Micro-Electro-Mechanical Systems Gyroscopes Using a Strong Tracking Kalman Filter* // *Sensors*, 2015, v. 15, pp. 11222–11238.
- [12] Narasimhappa1 M., Sabat S.L., Nayak J. *Adaptive sampling strong tracking scaled unscented Kalman filter for denoising the fibre optic gyroscope drift signal* // *IET Science, Measurement & Technology*, 2015, v. 9, iss. 3, pp. 241–249.
- [13] Jwo D.J., Lai S.Y. *Navigation integration using the fuzzy strong tracking unscented Kalman* // *Journal of Navigation*, 2009, v. 62, pp. 303–322.
- [14] Degtyarev A.A., Tayl' Sh. *Elementy teorii adaptivnogo fil'tra Kalmana* [Fuzzy control in technical systems]. Moscow: BMSTU, 2005, 200 p.
- [15] Takagi T., Sugeno M. *Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control* // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1985, v. 15(1), pp. 116–132.
- [16] Barragán, A.J., Al-Hadithi, B.M., Jiménez, A., Andújar, J.M. *A general methodology for online TS fuzzy modeling by the extended Kalman filter* // *Applied Soft Computing*, 2014, v. 18, pp. 277–289.

- [17] Jwo D.J., Wang S.H. Adaptive fuzzy strong tracking extended Kalman filtering for GPS navigation // IEEE Sensors, 2007, v. 7(5–6), pp. 778–789.
- [18] Arghavani N., Almobaied M., Guzelkaya M., Eksin I. On-line rule weighting for PID-type fuzzy logic controllers using extended Kalman filter // IFAC-Papers OnLine, 2017, v. 50, iss. 1, pp. 6946–6951.
- [19] Sasiadek J.Z., Wang Q., Zeremba M.B. Fuzzy adaptive Kalman filtering for INS/GPS data fusion // Proc. 15th IEEE Int. Symp. on Intelligent Control, Rio, Patras, Greece, 2000, pp. 181–186.
- [20] Chien-Hao Tseng, Chih-Wen Chang and Dah-Jing Jwo. Fuzzy adaptive interacting multiple model nonlinear filter for integrated navigation sensor fusion // Sensors, 2011, v. 11, pp. 2090–2111.
- [21] Pigat A. *Nechetkoe modelirovanie i upravlenie* [Fuzzy modeling and control]. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2013, 798 p.

Authors' information

Demenev Nikolay Petrovich — Cand. Sci. (Tech.), Associated Professor of the Department of Control System BMSTU, dnp@bmstu.ru

Chan Din' Min' — Pg., Department of Control System BMSTU, ruxi.tran@gmail.com.

Received 19.04.2019.

Accepted for publication 15.07.2019.

ЗАДАЧА НАЗНАЧЕНИЯ ПРИОРИТЕТОВ ЗАПРОСОВ НА ПРОВЕДЕНИЕ СЕАНСОВ СВЯЗИ С КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

Е.П. Сохранный

ФГУП ЦНИИмаш, 141070, Московская область, г. Королев, ул. Пионерская, д. 4

sep@mcc.rsa.ru

Для разрешения конфликтных ситуаций предлагается использование приоритетов запросов на проведение сеансов связи с космическим аппаратом. Поскольку численные соотношения между характеристиками факторов, влияющими на разрешение конфликтных ситуаций, и значениями приоритетов запросов отсутствуют, рекомендуется поэтапная заблаговременная подготовка исходных данных для решения задачи назначения приоритетов. Рассматриваются иерархическая структура факторов (данных), влияющих на разрешение конфликтных ситуаций, матрицы отношений, формируемые по результатам экспертного опроса, и матрицы сравнений элементов иерархической структуры, формируемые на основании матриц отношений. Разработана схема формирования значений элементов матрицы сравнений. Представлена полученная возможность формализации и автоматизации последующих этапов решения задачи, на которых рассчитываются значения весовых коэффициентов элементов иерархической структуры и значения приоритетов запросов. Показано, что использование численных значений приоритетов запросов, обеспечение требуемых показателей качества экспертной группы и согласованности экспертных оценок позволяют повысить оперативность принятия и обосновать решения по разрешению конфликтных ситуаций.

Ключевые слова: космический аппарат, конфликтная ситуация, иерархическая структура, приоритет запроса

Ссылка для цитирования: Сохранный Е.П. Задача назначения приоритетов запросов на проведение сеансов связи с космическими аппаратами // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2019. Т. 23. № 4. С. 98–105. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-98-105

Важность решения задачи назначения приоритетов запросов на проведение сеансов связи с космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения обусловлена необходимостью разрешения возможных конфликтных ситуаций по задействованию средств, возникающих при необходимости использования ресурсов одних и тех же средств в одно и то же время для работы с различными космическими аппаратами. Отсутствие, а также принятие несвоевременных и необоснованных решений по разрешению конфликтных ситуаций могут привести к дезорганизации управления космическим аппаратом, орбитальной группировки космических аппаратов, потере управления и самого космического аппарата, что обуславливает повышенные требования к оперативности принятия и обеспечению обоснованности принимаемых решений [1]. Существующие программные средства [2, 3] позволяют осуществлять автоматизированное планирование применения средств управления космическими аппаратами при отсутствии конфликтных ситуаций, а при их возникновении — только обнаружение. Известные классические способы планирования, в том числе основанные на теории расписаний, теории массового обслуживания, линейного программирования [4–6], не могут быть применены из-за особенностей управления космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения по зонам радиовидимости космических аппаратов средствами управления и в соответствии с технологическими циклами

управления (ТЦУ) космическими аппаратами, что обуславливает необходимость разработки оригинального специального программного обеспечения, особенно при возникновении конфликтных ситуаций. В различных источниках [7–10] предлагаются варианты разрешения конфликтных ситуаций с учетом отдельных факторов, однако их комплексный учет, а также численные оценки важности конфликтующих запросов на проведение сеансов связи с космическими аппаратами на основании комплексного учета факторов отсутствуют, что и обуславливает необходимость решения задачи назначения приоритетов запросов на проведение сеансов связи с космическими аппаратами.

Цель работы

Целью работы является описание подготовки исходных данных для решения задачи назначения приоритетов запросов на проведение сеансов связи с космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения.

Материалы и методы

Исходными данными для решения поставленной задачи служат иерархическая структура факторов (данных), влияющих на разрешение конфликтных ситуаций, матрицы отношений, формируемые по результатам экспертного опроса, матрицы сравнений элементов иерархической структуры, формируемые на основании матриц отношений.

Подготовка исходных данных включает в себя следующие этапы:

- 1) формирование экспертной группы;
- 2) проведение инструктажа экспертной группы по разработке иерархической структуры данных поставленной задачи; формирование иерархической структуры;
- 3) разработку опросных листов для получения экспертных оценок по относительной важности элементов иерархической структуры;
- 4) формирование матриц отношений;
- 5) формирование матриц сравнений.

1. Формирование экспертной группы

Экспертная группа должна быть представлена независимыми специалистами с опытом работы в области управления различными космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения, планирования задействования наземных средств космических аппаратов и с опытом разрешения конфликтных ситуаций по задействованию наземных средств управления при обеспечении управления этими космическими аппаратами.

Важное значение имеет количество специалистов в экспертной группе. В общем, численность экспертной группы зависит от требований к точности результатов экспертизы и допустимой трудоемкости оценочных процедур [11]. При недостатке экспертов появляется излишнее влияние оценки каждого эксперта на общий результат, что увеличивает недостоверность групповой оценки, а при большом их числе возникают трудности в выработке единого (консолидированного) мнения экспертной группы.

Рациональное увеличение доверительной вероятности результатов экспертной оценки определяем условием

$$\frac{dP}{dn} \geq 1, \quad (1)$$

где P — доверительная вероятность экспертной оценки; n — количество экспертов.

Условие (1) определяет верхнюю границу диапазона, в рамках которого обеспечивается преобладающий рост доверительной вероятности экспертной оценки относительно увеличения количества экспертов в группе.

Аналогично можно определить верхнюю границу диапазона количества экспертов в группе, определяющую максимально допустимое количество экспертов, превышение которого не приводит к требуемому увеличению вероятности экспертной оценки:

$$\frac{dP}{dn} \geq k, \quad (2)$$

где k — критерий, определяющий цену увеличения количества экспертов в группе; значение k задает руководитель экспертной группы.

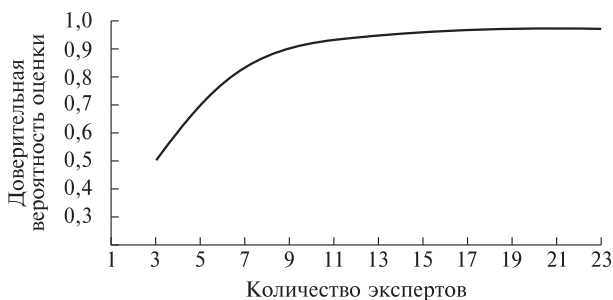


Рис. 1. Зависимость доверительной вероятности результатов экспертной оценки от количества экспертов в группе
Fig. 1. Dependence of the confidence level of the expert assessment results on the number of experts in the group

По графику (рис. 1) [12] можно определить, что увеличение количества экспертов в группе, удовлетворяющее условию (1), ограничено числом 7, а увеличение числа экспертов более 20 практически не повышает доверительной вероятности результатов экспертной оценки. Поэтому на практике рекомендуется не менее 7 и не более 20 экспертов в группе.

2. Инструктаж экспертной группы по разработке иерархической структуры, формирование иерархической структуры.

Перед проведением опроса экспертов руководитель экспертной группы проводит инструктаж, на котором подробно описывает рассматриваемую проблему и ставит задачу по разработке иерархической структуры.

Суть проблемы заключается в отсутствии аппарата, позволяющего назначать приоритеты запросов на проведение сеансов связи с космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения. Основой для разработки такого аппарата является иерархическая структура факторов (данных), влияющих на разрешение конфликтных ситуаций (приоритеты запросов). Иерархическая структура представляет собой ярусно-параллельный граф (ЯПГ), верхняя вершина которого отражает цель задачи — приоритет запроса на проведение сеанса связи с космическими аппаратами, нижерасположенные вершины отражают факторы, влияющие на приоритет.

Каждый элемент иерархической структуры имеет наименование, порядковый номер (p) среди элементов своего яруса (r) и весовой коэффициент (k_{pq}^r), отражающий его влияние (вес) на элемент (q) вышерасположенного яруса ($r-1$) с точки зрения приоритета запроса на проведение сеанса связи.

Более подробно процесс формирования иерархической структуры представлен в статье [1]. Предложенная в ней иерархическая структура может рассматриваться в качестве примера как исходная для разработки, которую можно корректировать в плане добавления/исключения

Т а б л и ц а 1

Матрица отношений для трех сравниваемых элементов
Relational matrix for three compared items

Левый элемент	Номер строки l	Степень превосходства									Правый элемент
		Абсолютное	Очень сильное	Сильное	Слабое	Равное	Слабое	Сильное	Очень сильное	Абсолютное	
		Номер столбца m									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
\mathcal{E}_i											\mathcal{E}_j
\mathcal{E}_1	1										\mathcal{E}_2
\mathcal{E}_1	2										\mathcal{E}_3
\mathcal{E}_2	3										\mathcal{E}_3

Примечание. $i = \overline{1, I-1}; j = i+1, i+2, \dots, I; m = \overline{1, M}$ ($M=9$ — количество отношений); $l = \overline{1, L}$ ($L = \frac{I(I-1)}{2}$ — количество строк матрицы отношений, равное количеству парных сравнений); I — количество элементов сравнения в данной группе

отдельных элементов, групп, ярусов и связей между ними для формирования модели иерархической структуры, адекватной условиям применения.

После получения данных экспертного опроса руководитель экспертной группы обобщает их и формирует обобщенную иерархическую структуру.

3. Разработка опросных листов для получения экспертных оценок по относительной важности элементов иерархической структуры.

При проведении экспертного опроса определяется степень превосходства (вес, важность) одних элементов над другими элементами группы (группами) одного яруса иерархической структуры по влиянию на элементы вышерасположенного яруса с точки зрения приоритета запроса на проведение сеанса связи. Для получения экспертных данных каждому эксперту на основании сформированной иерархической структуры разрабатываются опросные листы в виде матрицы отношений, аналогично представленной в табл. 1, для каждой группы (групп) сравниваемых элементов с учетом связей с элементами вышерасположенного яруса.

Количество матриц отношений на каждом ярусе иерархической структуры равно количеству связей группы (групп) сравниваемых элементов данного яруса с элементами вышерасположенного яруса иерархической структуры.

4. Формирование матриц отношений.

При формировании матриц отношений используются метод экспертного опроса, метод анализа иерархий и метод парных сравнений. Суждения о важности элементов иерархической структуры эксперты отражают в форме матрицы отношений, пример которой представлен в табл. 2, в крайних левом и правом столбцах матрицы расположены сравниваемые элементы: $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \mathcal{E}_3$ и т. д.

Суждения располагаются в ряд от одного крайнего значения (абсолютное превосходство) к равенству и затем вновь повышаются до второго крайнего значения. Эксперту требуется сравнить элементы в левом столбце с противостоящими элементами в правом столбце, поставив отметку в соответствующем его суждению поле. Если элемент из левого столбца \mathcal{E}_i превосходит элемент из правого столбца \mathcal{E}_j по влиянию на элемент вышерасположенного яруса с точки зрения приоритета сеанса связи, то отмечается (например, устанавливается равной единице) одна из позиций левее графы «Равное», в противном случае — правее данной графы, при равной важности — отметка в поле «Равное». Таким образом эксперты назначают степень качественного превосходства (качественные оценки) одних элементов группы (яруса), групп одного яруса над другими элементами этой же группы (яруса), группами этого же яруса иерархической структуры по влиянию на элементы или группы вышерасположенного яруса с точки зрения приоритета запроса.

Численные значения важности элементов оцениваются по шкале отношений (см. табл. 2), выбор которой основывается на склонности человека приводить в соответствие оттенки чувств с числами 1–9, а также способности проводить качественные разграничения пятью определенными: равный, слабый, сильный, очень сильный и абсолютный [13, 14]. При необходимости могут использоваться промежуточные компромиссные значения оценок, равные 2, 4, 6, 8.

Формально матрица отношений представляет собой множество S^o в виде

$$S^o = \{c_{lm}^{qh}\}, l = \overline{1, L}, m = \overline{1, M}, h = \overline{1, H}, q = \overline{1, Q}, (1)$$

Т а б л и ц а 2
Оценки шкалы отношений
Ratings Scales

Чис- ленное значение оценки	Значение качествен- ной оценки	Пояснение
1	Равная важность	Элементы имеют одинаковую важность, равный вклад в цель
3	Слабое, умеренное превосход- ство	Опыт и суждение дают легкое превосходство одного элемента над другим
5	Сильное, суще- ственное превосход- ство	Имеются надежные данные или логические суждения, чтобы показать предпочтительность одного из элементов
7	Значи- тельное превосход- ство	Убедительное свидетельство в пользу одного элемента перед другим, настолько сильное пред- почтение, что элемент становится практически значительным
9	Абсо- лютное превосход- ство	Свидетельства в пользу предпо- чтения одного элемента перед другим в высшей степени убеди- тельны

где q — номер вершины вышерасположенного яруса иерархической структуры, с которым связана вершина данного яруса; Q — количество вершин на вышерасположенном ярусе иерархической структуры; h — номер эксперта; H — количество экспертов.

Значения элементов матрицы отношений определяются скобкой (нотацией) Айверсона

$$c_{lm}^{qh} = \begin{cases} 1, & \text{если } o_{lm}^{qh} = o_m^t; \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (2)$$

где o_{lm}^{qh} — значение качественной оценки h -го эксперта по m -му столбцу при сравнении элементов \mathcal{E}_i и \mathcal{E}_j l -й строк по влиянию на элемент номер q вышерасположенного яруса; o_m^t — табличное значение качественной оценки по шкале отношений (см. табл. 2), $o_m^t \in O^t$; O^t — множество табличных оценок

$$O^t = \{o_m^t\}. \quad (3)$$

5. Формирование матриц сравнений.

При формировании матриц сравнений используется метод соответствий. Матрица сравнений $A = \{a_{ij}\}$ представляет собой квадратную матрицу размерности $I \times I$. Строки и столбцы матрицы сравнений соответствуют элементам рассматриваемой группы иерархической структуры. Элементами матрицы сравнений являются численные значения оценки (см. табл. 2), соответствующие степени превосходства элемента, стоящего в левом столбце матрицы сравнений, по отношению

к элементу, стоящему в верхней строке матрицы сравнений.

Матрицу сравнений A представляем в виде объединения подмножеств A^d :

$$A = \bigcup_{d=1}^3 A^d; \quad (4)$$

$$A^d = \{a_{ij}^d\}, \quad d = \overline{1, 3}, \quad (5)$$

где d — номер подмножества.

Числовые значения элементов матрицы сравнений формируются по следующим правилам:

– числовое значение, определенное по шкале отношений и соответствующее отмеченной позиции в строке матрицы отношений, заносится в поле матрицы сравнения, координатами которого являются номера сравниваемых элементов из левого и правого столбцов матрицы отношений рассматриваемой строки

$$A^1 = \{a_{ij}^1\} = \{b_m, m : c_{lm}^{qh} = 1, \varphi_2 : l \rightarrow i^1, j^1, \varphi_1 : m \rightarrow b_m\}; \quad (6)$$

– диагональ матрицы состоит из единиц, так как относительно самого себя элемент сравнения имеет такую же важность

$$A^2 = \{a_{ij}^2\} = \{1, i^2 = j^2\}; \quad (7)$$

– элементы подмножества A^3 обратно-симметричны элементам подмножества A^1 , то есть в позиции (i, j) подмножества A^3 должно стоять значение, обратное значению в позиции (j, i) подмножества A^1

$$A^3 = \{a_{ij}^3\} = \{1/b_m, i^3 = j^1, j^3 = i^1 : A^3 = A - \bigcup_{d=1,2} A^d\}; \quad (8)$$

где a_{ij}^d — численное значение сравнительной оценки элементов подмножества A^d с номерами (координатами) i и j ; i, j — номера сравниваемых элементов, соответствующие номерам строк и столбцов матрицы сравнений $(i, j = \overline{1, I})$, верхние индексы определяют принадлежность к подмножеству A^d ; b_m — табличное численное значение качественной оценки; m — номер оценки (столбца); $:$ — знак «такое, что»; \bigcup — знак объединения множеств; $\varphi_1 : M \rightarrow B$ — табличное соответствие (табл. 3) между множествами элементов M и B состоит из упорядоченных пар, каждая пара $(m, b_m) \in \varphi_1$ указывает на то, что элементу $m \in M$, для которого $c_{lm}^{qh} = 1$, соответствует элемент $b_m \in B$ при данном (табличном) соответствии φ_1

$$\varphi_1 : M \rightarrow B; \quad (9)$$

$\varphi_2 : L^c \rightarrow (I^1, J^1)$ — табличное соответствие (табл. 4)

Т а б л и ц а 3

Соответствие φ_1
Compliance φ_1

c_{lm}^{gh}	m	b_m
1	5	1
1	4, 6	3, 1/3
1	3, 7	5, 1/5
1	2, 8	7, 1/7
1	1, 9	9, 1/9

между множеством номеров строк (L^c) матрицы отношений и множеством координат (I^1, J^1) элементов матрицы сравнений (множеством номеров сравниваемых элементов), состоящее из упорядоченных пар, каждая пара $((l, (i^1, j^1)) \in \varphi_2$ указывает, что элементу $l \in L^c$ соответствует пара элементов $(i^1, j^1) \in N^3$ при данном (табличном) соответствии φ_2

$$\varphi_2: L^c \rightarrow (I^1, J^1), \quad (10)$$

где $L^c = \{1, 2, \dots, L\}$ — множество номеров строк матрицы отношений; $N^3 = \{1, 2, \dots, I\}$ — множество номеров элементов сравнения.

Областью определения соответствия φ_1 является множество M номеров строк, для которых значения элементов матрицы отношений равны единице

$$D \text{ от } \varphi_1 = \{m \in M, m : c_{lm}^{gh} = 1, \exists b_m \in B : (m, b_m) \in \varphi_1\}. \quad (11)$$

Множеством значений соответствия φ_1 является множество B табличных числовых значений, соответствующих качественным оценкам экспертов, для которых $c_{lm}^{gh} = 1$

$$Im \varphi_1 = \{b_m \in B, m : c_{lm}^{gh} = 1, \exists m \in M : (m, b_m) \in \varphi_1\}, \quad (12)$$

где $B = \{1, 3, 5, 7, 9\}$; \in — знак «содержится в» (принадлежность элемента множеству); \exists — квантор: существует по меньшей мере один элемент...; \rightarrow — символ однонаправленного следования; c_{lm}^{gh} — признак совпадения оценки эксперта и табличной оценки строки l столбца m матрицы отношений; l — номер строки матрицы отношений (номер парного сравнения, оценки).

Областью определения соответствия φ_2 является множество L^c номеров строк матрицы отношений

$$D \text{ от } \varphi_2 = \{l \in L^c : \exists (i^1, j^1) \in N^3 : (l, (i^1, j^1)) \in \varphi_2\}. \quad (13)$$

Множеством значений соответствия φ_2 является множество координат (I^1, J^1) элементов матрицы сравнений

Т а б л и ц а 4

Соответствие φ_2 для трех элементов сравнения
Correlation φ_2 for three comparison items

l	i^1	j^1
1	1	2
2	1	3
3	2	3

$$Im \varphi_2 = \{(i^1, j^1) \in N^3 : \exists l \in L^c : (l, (i^1, j^1)) \in \varphi_2\}. \quad (14)$$

Соответствие φ_2 определяется при построении матриц отношений и зависит от числа сравниваемых элементов.

Схема формирования элементов матрицы сравнений представлена на рис. 2.

Результаты и обсуждение

Полученные результаты планируется использовать на последующих этапах автоматизированного решения задачи назначения приоритетов при расчете обобщенных значений весовых коэффициентов элементов иерархической структуры и значений приоритетов запросов для использования последних при разрешении конфликтных ситуаций по задействованию наземных средств управления.

Преимуществом предлагаемой подготовки исходных данных является возможность заблаговременной подготовки, т. е. до начала непосредственного расчета значений приоритетов запросов, что очень важно для повышения оперативности принимаемых решений по разрешению конфликтных ситуаций в условиях жестких временных ограничений и возрастающей трудоемкости процесса подготовки данных при увеличении состава орбитальной группировки космических аппаратов.

Выводы

1. Определены этапы подготовки исходных данных для решения задачи назначения приоритетов запросов на проведение сеансов связи с космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения и их содержание. В качестве исходных данных рассматриваются иерархическая структура факторов (данных), влияющих на разрешение конфликтных ситуаций (приоритеты запросов на проведение сеансов связи с космическими аппаратами), матрицы отношений и матрицы сравнений элементов иерархической структуры.

2. Предложено математическое обоснование условий, определяющих диапазон выбора количества экспертов в группе, по которому обоснована

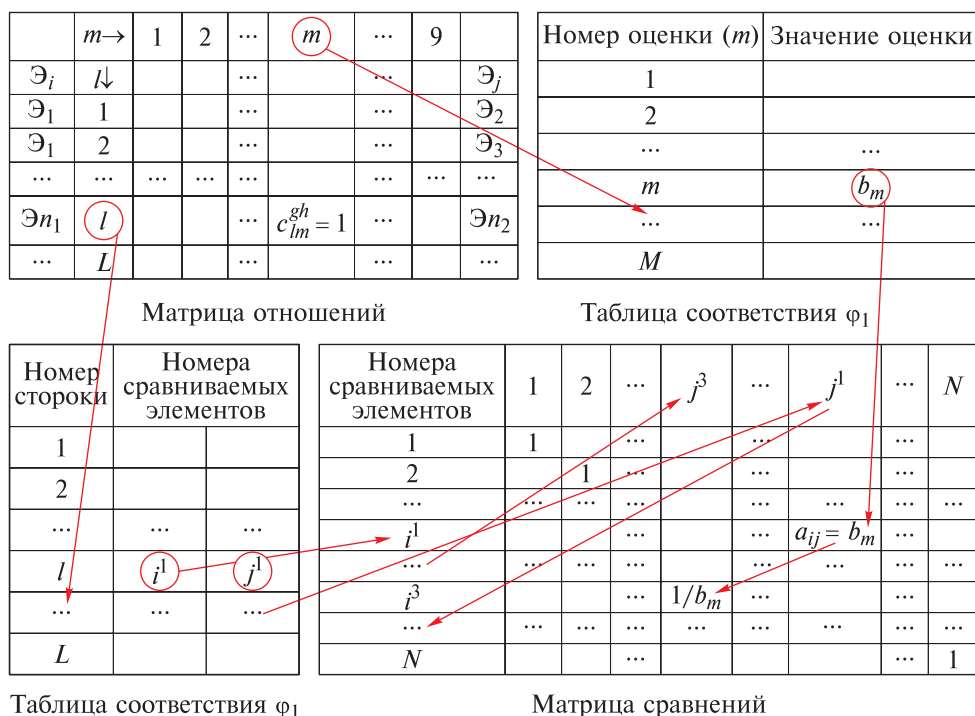


Рис. 2. Схема формирования элементов матрицы сравнений
 Fig. 2. Scheme of comparison matrix elements formation

рациональность состава экспертной группы в количестве от 7 до 20 чел.

3. Предложено формальное представление исходных данных для решения задачи назначения приоритетов и процесса подготовки матриц сравнений, используемых на последующих этапах автоматизированного решения поставленной задачи.

Список литературы

[1] Вороновский В.В., Дудко А.Н., Матюшин М.М., Сохранный Е.П., Усиков С.Б., Сохранная А.Е. Задача назначения приоритетов запросов на проведение сеансов связи с космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения. Формирование иерархической структуры исходных данных // Космонавтика и ракетостроение, 2018. Вып. 1 (100). С. 89–99.

[2] Кучеров Б.А. Программа ведения базы данных по состоянию средств наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения и измерений v.2.0.: Патент № 2015610757. Дата регистрации: 16.01.2015. Номер заявки: 2014661671. Дата подачи заявки: 18.11.2014. Правообладатели: ФГУП ЦНИИмаш.

[3] Литвиненко А.О. Программный комплекс автоматизированного планирования задействования средств наземного автоматизированного комплекса управления // Тр. МАИ, 2016. № 86. С. 15.

[4] Лазарев А.А. Алгоритмы в теории расписаний, основанные на необходимых условиях оптимальности // Исследования по прикладной математике, 1984. Вып. 10. С. 102–110.

[5] Гурин Л.С., Дымарский Я.С., Меркулов А.Д. Задачи и методы оптимального распределения ресурсов. М.: Советское радио, 1968. 463 с.

[6] Кофман А., Крюон Р. Массовое обслуживание. Теория и приложение. М.: Мир, 1965. 302 с.

[7] Дудко А.Н., Кучеров Б.А., Литвиненко А.О., Сохранный Е.П. Метод планирования бесконфликтного задействования наземных технических средств при обеспечении управления группировкой космических аппаратов // Космонавтика и ракетостроение, 2014. № 1(74). С. 155–163.

[8] Дудко А.Н., Кучеров Б.А., Литвиненко А.О., Овечко В.М., Паздников В.Ю., Сохранный Е.П. Способ разрешения конфликтных ситуаций при управлении полетами космических аппаратов. Патент РФ № 2566171. Правообладатели: ФГУП ЦНИИмаш. URL: <https://patentdb.ru/patent/2566171> (дата обращения 18.12.2018).

[9] Алексахина А.А., Дудко А.Н., Кучеров Б.А., Литвиненко А.О., Хроменков А.С. Метод превентивного разрешения конфликтных ситуаций при планировании задействования средств управления космическими аппаратами // Космонавтика и ракетостроение, 2017. № 2(95). С. 46–54.

[10] Поливников В.М. Распределение наземных средств управления космическими аппаратами методом последовательного исключения конфликтных ситуаций // VII науч.-техн. конф. Центра управления полетами, г. Королев, ЦНИИмаш, 4–7 апреля 2017. Королев: ЦНИИмаш, 2017. С. 292–296.

[11] Менеджмент качества на современном предприятии / под ред. А.В. Владимирцева. СПб.: Ассоциация по сертификации «Русский Регистр», 2003. 422 с.

[12] Марцынковский Д.А., Владимирцев А.В., Марцынковский О.А. Руководство по риск-менеджменту. СПб.: Береста, 2007. 330 с.

[13] Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.

[14] Кацман В.Е., Косорукова И.В., Родин А.Ю., Харитонов С.В. Основы оценочной деятельности. М.: Университет «Синергия», 2012, 336 с.

Сведения об авторе

Сохраный Евгений Петрович — и. о. начальника лаборатории ФГУП ЦНИИмаш, sep@mcc.rsa.ru

Поступила в редакцию 19.04.2019.

Принята к публикации 15.07.2019.

ISSUE OF APPOINTING PRIORITIES FOR REQUESTS TO CARRY OUT COMMUNICATION SESSIONS WITH SPACECRAFTS

E.P. Sokhranniy

Central Research Institute for Machine Building (TSNIIMASH), 4, Pionerskaya st., 141005, Korolyov, Moscow reg., Russia
sep@mcc.rsa.ru.

To resolve conflicts, it is proposed to use the priorities of requests for conducting communication sessions with the spacecraft. Since there are no numerical relationships between the characteristics of factors affecting the solution of conflict situations and the priority values of requests, a phased early preparation of the initial data for solving the priority assignment problem is recommended. The hierarchical structure of factors (data) affecting the resolution of conflict situations, the matrix of relations formed by the results of an expert survey, and the matrix of comparisons of elements of the hierarchical structure formed on the basis of the matrix of relations are considered. A scheme has been developed for the formation of values of the elements of the comparison matrix. The obtained opportunity is presented to formalize and automate the subsequent stages of solving the problem, on which the values of the weight coefficients of the elements of the hierarchical structure and the values of the priorities of the queries are calculated. It is shown that the use of numerical values of query priorities, providing the required quality indicators of the expert group and the consistency of expert assessments can improve the efficiency of adoption and substantiate decisions to resolve conflict situations.

Keywords: spacecraft, conflicting situation, hierarchical structure, request priority

Suggested citation: Sokhranniy E.P. *Zadacha naznacheniya prioritetov zaprosov na provedenie seansov svyazi s kosmicheskimi apparatami* [Issue of appointing priorities for requests to carry out communication sessions with spacecrafts]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 4, pp. 98–105.
DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-98-105

Reference

- [1] Voronovskiy V.V., Dudko A.N., Matyushin M.M., Sokhranniy E.P., Usikov S.B., Sokhrannaya A.E. *Zadacha naznacheniya prioritetov zaprosov na provedenie seansov svyazi s kosmicheskimi apparatami nauchnogo i sotsial'no-ekonomicheskogo naznacheniya. Formirovanie ierarkhicheskoy struktury iskhodnykh dannykh* [The Task on Prioritizing Requests for Communication Sessions with Scientific and Social-Economic Spacecraft. Generation of Source Data Hierarchical Structure]. *Kosmonavtika i raketostroyeniye* [Cosmonautics and Rocket Engineering], 2018, v. 1 (100), pp. 89–99.
- [2] Kucherov B.A. *Programma vedeniya bazy dannykh po sostoyaniyu sredstv nazemnogo avtomatizirovannogo kompleksa upravleniya kosmicheskimi apparatami nauchnogo i sotsial'no-ekonomicheskogo naznacheniya i izmereniy v.2.0.* [Database Management SW for Status Control of Ground-Based Computer-Aided Complex Equipment Designed for Control of Scientific and Social-Economic Spacecraft and Measurements V. 2.0] Patent № 2015610757. Data registratsii: 16.01.2015. Nomer zayavki: 2014661671. Data podachi zayavki: 18.11.2014. Pravoobladateli: FGUP TsNIImash.
- [3] Kucherov B.A., Sokhranniy E.P., Drozdova E.V., Romanyugin D.V. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registratsii programmy dlya EVM № 2010611191. Programmy kompleksa operativnogo planirovaniya zadaystvovaniya sredstv nazemnogo avtomatizirovannogo kompleksa upravleniya kosmicheskimi apparatami nauchnogo i sotsial'no-ekonomicheskogo naznacheniya i izmereniy* [Certificate for State Registration of PC SW No. 2010611191. SW Complex for Timely Planning Operation of Ground-Based Computer-Aided Complex Designed for Control of Scientific and Social-Economic Spacecraft and Measurements], 2010.
- [4] Litvinenko A.O. *Programmy kompleksa avtomatizirovannogo planirovaniya zadaystvovaniya sredstv nazemnogo avtomatizirovannogo kompleksa upravleniya* [Software complex for automated planning of the use of ground-based automated control complex]. *Trudy MAI*, 2016, no. 86, p. 15.
- [5] Gurin L.S., Dymarskiy Ya.S., Merkulov A.D. *Zadachi i metody optimal'nogo raspredeleniya resursov* [Optimum Resources Allocation Tasks and Technique]. Moscow: Sovetskoe radio [Publication of Sovetskoye Radio Publ.], 1968, 463 p.
- [6] Kofman A., Kryuon R. *Massovoe obsluzhivanie. Teoriya i prilozhenie* [Queuing Theory, Theory and Applications]. Moscow: Mir, 1965, 302 p.
- [7] Dudko A.N., Kucherov B.A., Litvinenko A.O., Sokhranniy E.P. *Metod planirovaniya beskonfliktного zadaystvovaniya nazemnykh tekhnicheskikh sredstv pri obespechenii upravleniya gruppировкой kosmicheskikh apparatov* [Planning Technique for Conflict-Free Use of Ground-Based Equipment Designed for Spacecraft Constellation Control]. *Kosmonavtika i raketostroyeniye* [Publication «Cosmonautics and Rocket Engineering»], 2014, v. 1 (74), pp 155–163.
- [8] Dudko A.N., Kucherov B.A., Litvinenko A.O., Ovechko V.M., Pazdnikov V.Yu., Sokhranniy E.P. *Sposob razresheniya konfliktnykh situatsiy pri upravlenii poletami kosmicheskikh apparatov.* [Conflicting Situations Resolution Method Used in Spacecraft Mission Control Applications], Pat. Russian Federation no. 2566171. Patent RF № 2566171. Pravoobladateli: FGUP TsNIImash. Available at: <https://patentdb.ru/patent/2566171> (accessed 18.12.2018).

- [9] Aleksakhina A.A., Dudko A.N., Kucherov B.A., Litvinenko A.O., Khromenkov A.S. *Metod preventivnogo razresheniya konfliktnykh situatsiy pri planirovani zadeystvovaniya sredstv upravleniya kosmicheskimi apparatami* [Method for Preventive Resolution of Conflicting Situations when Planning the Use of Spacecraft Control Equipment]. *Kosmonavtika i raketostroyeniye* [Publication «Cosmonautics and Rocket Engineering»], 2017, v. 2 (95), pp 46–54.
- [10] Polivnikov V.M. *Raspredelenie nazemnykh sredstv upravleniya kosmicheskimi apparatami metodom posledovatel'nogo isklyucheniya konfliktnykh situatsiy* [Allocation of Ground-Based Equipment for Spacecraft Control Using the Method of Sequential Exclusion of Conflicting Situations]. VII nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya Tsentra upravleniya poletami, [The 7th Mission Control Center Science and Technology Conference TsNIImash]. Korolev, TsNIImash, 4–7 aprelya 2017. Korolev: TsNIImash, 2017, pp. 292–296.
- [11] *Menedzhment kachestva na sovremennom predpriyatii* [Modern Enterprise Quality Management]. Ed. A.V. Vladimirtsev. Saint Petersburg: Izdanie Assotsiatsii po sertifikatsii «Russkiy Registr» [Saint Petersburg, Publ. of Russkiy Registr Certification Association], 2003, 422 p.
- [12] Martsynkovskiy D.A., Vladimirtsev A.V., Martsynkovskiy O.A. *Rukovodstvo po risk-menedzhmentu* [Risk Management Guidance]. Sankt-Peterburg: Beresta, 2007, 330 p.
- [13] Saati T. *Prinyatie resheniy. Metod analiza ierarkhiy* [Decision Making. Hierarchy Analysis Method]. Moscow: Radio i svyaz', 1993, 278 p.
- [14] Katsman V.E., Kosorukova I.V., Rodin A.Yu., Kharitonov S.V. *Osnovy otsenochnoy deyatel'nosti* [Valuation Activities Baselines]. Moscow: University «Sinergiya», 2012, 336 p.

Author's information

Sokhranniy Evgeniy Petrovich — Deputy Head of Laboratory FGUP TSNIIMASH, sep@mcc.rsa.ru

Received 19.04.2019.

Accepted for publication 15.07.2019.

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА ЛАБОРАТОРНЫХ И ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ ПО ИЗУЧЕНИЮ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Е.В. Санников¹, А.С. Несмелова², К.С. Несмелова³, Д.А. Герасименко³

¹Хакасский государственный университет имени Н.Ф. Катанова, 655000, Республика Хакасия, г. Абакан, ул. Ленина, д. 90

²ПАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева, 141070, Московская обл., г. Королев, ул. Ленина, д. 4а

³МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1

sannikoov@yandex.ru

Рассмотрены возможности искусственного интеллекта на примере работы простейших нейронных сетей и подходы к его изучению во время обучения студентов. Разработан и внедрен в учебный процесс комплекс лабораторных и практических работ по изучению нейронных сетей на основе проектирования и реализации интерфейса однослойной нейронной сети методами объектно-ориентированного программирования. Создана простейшая нейросеть, позволяющая распознавать и классифицировать монохромные изображения. В качестве модели нейрона представлена известная модель простого процессорного элемента. Приведена математическая модель нейронной сети, в виде компьютерной модели, в которой применяется метод Хейбба. Обучение нейронов реализовано с помощью применения алгоритма расчета весовых коэффициентов. На основе данной модели на языке C++ в среде Builder C++ разработано учебное приложение «Neural nets are easy», позволяющее успешно решать задачи распознавания монохромных изображений. Создание и внедрение в учебный процесс предлагаемого курса лабораторных и практических работ позволит студентам детально разобраться в строении нейронных сетей, принципе их создания и работы, а также существенно повысить свой багаж знаний в области прикладного искусственного интеллекта.

Ключевые слова: нейронные сети, искусственный интеллект, комплекс лабораторных работ

Ссылка для цитирования: Санников Е.В., Несмелова А.С., Несмелова К.С., Герасименко Д.А. Разработка комплекса лабораторных и практических работ по изучению нейронных сетей // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2019. Т. 23. № 4. С. 106–111. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-106-111

В середине XX в. появился термин «нейронная сеть». Первопроходцами в этой области стали У.С. Мак-Каллок и В. Питтс [1]. Ими была создана компьютерная модель нейросети, в основе которой лежали теории работы головного мозга и математические алгоритмы [2]. Нейронные сети и искусственный интеллект всегда интересовали ученых. Термин «нейронная сеть» окончательно вошел в повседневное употребление несколько лет тому назад.

Нейронные сети — это одно из направлений научных исследований в области создания искусственного интеллекта, в основе которого лежит имитация нервной системы человека, а также создание математической модели и ее аппаратная или программная реализация.

Любая нейронная сеть состоит из искусственных (формальных) нейронов или математических нейронов Мак-Каллока — Питтса. Внутри сети нейроны представлены в виде узлов. Термин «узел» применяется для обозначения и представления единичного нейрона в структуре нейронной сети в рамках ее графовой модели, т. е. является упрощенной моделью естественного нейрона [3]. Узлы искусственных нейронов бывают трех видов: входные, скрытые, выходные.

На входные и скрытые узлы не поступают входные данные и не считываются выходные данные нейронной сети, а выходные данные выходных узлов образуют выходной сигнал ней-

ронной сети (рис. 1). В математических моделях они представляются как нелинейные функции от единственного элемента линейной комбинацией всех входных сигналов. Результат отправляется на единственный выход. Это дает возможность объединять такие нейроны в сети, соединяя выходы одних нейронов с входами других.

Идея нейронных сетей состоит в том, чтобы максимально близко смоделировать работу и структуру человеческой нервной системы. Одной из особенностей искусственного интеллекта является возможность самостоятельного обучения, использования предыдущего опыта и выполнения действий на его основе при уменьшении количества ошибок [3].

Отметим, что простые модели искусственных нейронов игнорируют многие свойства естественных нейронов. В математических моделях пренебрегают задержкой времени, влияющей на динамику системы, т. е. входные сигналы сразу же, мгновенно, порождают выходной сигнал. Еще одно важное отличие состоит в том, что в подобных моделях нейрона не учитываются частотные модуляции или синхронизирующие функции естественных нейронов [3].

Каждая нейронная сеть состоит из большого числа отдельных вычислительных элементов. Это означает, что к определенному слою сети относятся определенные «нейроны». Входные данные проходят обработку последовательно на всех слоях сети.

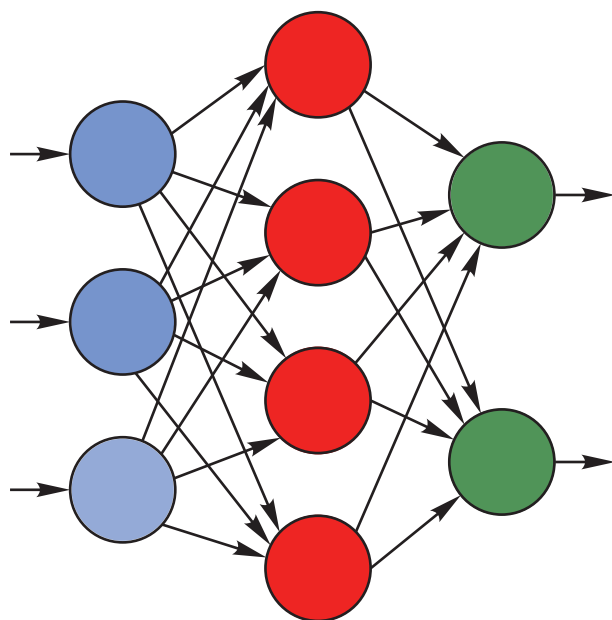


Рис. 1. Узлы искусственных нейронов: входной (синий), скрытый (красный), выходной (зеленый)

Fig. 1. The nodes of artificial neurons: input (blue), hidden (red), output (green)

Параметры вычислительных элементов, в зависимости от результатов, полученных на предыдущих наборах входных данных, могут изменяться, как следствие, изменяя порядок работы всей системы.

Часть задач, которые могут решать нейронные сети, так или иначе связана с обучением. Нейронные сети применяются в таких областях, как принятие решений, распознавание образов, оптимизация, анализ данных и прогнозирование.

Искусственная нейронная сеть лежит в основе современных систем распознавания и синтеза речи, распознавания и обработки изображений. Она применяется в навигационных системах промышленных роботов, беспилотных автомобилей и летательных аппаратов.

Алгоритмы на основе нейронных сетей защищают информационные системы от атак злоумышленников и помогают выявлять незаконный контент в сети [4].

Возможности искусственного интеллекта широко применяются в космической отрасли: для контроля и диагностики подсистем космических аппаратов [5], анализа данных дистанционного зондирования Земли [6], расчета аэродинамических характеристик [7, 8], распознавания пространственных данных на космических снимках [9]. Благодаря нейросетям сокращается время обработки данных и появляется возможность получения четких изображений из размытых снимков.

Цель работы

Цель работы — создание комплекса лабораторных и практических работ по изучению нейронных сетей. Для достижения поставленной цели было необходимо изучение их строения, взаимосвязи принципов создания и обучения; проведение анализа существующих методов создания и обучения; построение математической модели нейронной сети, ее реализация и разработка учебного приложения.

Описание модели

В МГТУ им. Баумана нейронные сети изучают в основном в среде MATLAB, хотя существует и множество других подходов, один из них реализован в Хакасском государственном университете имени Н.Ф. Катанова.

Распознавание образов формально определяется как процесс, в котором получаемый образ/сигнал следует отнести к одному из predetermined классов. Для решения задач распознавания образов с помощью нейронной сети необходимо сначала обучить нейросеть, подавая последовательность входных образов вместе с категориями, к которым принадлежат эти образы. После обучения сети на вход подается ранее не использованный образ, принадлежащий тому же набору категорий, что и множество образов, использованных при обучении. Благодаря полученной информации, выделенной из данных обучения, сеть сможет классифицировать представленный образ и отнести его к конкретному классу.

Распознавание, выполняемое нейронной сетью, является статистическим. Образы при этом являются отдельными точками в многомерном пространстве решений. Все пространство решений разделяется на отдельные области, каждая из которых ассоциируется с определенным классом. Границы этих областей формируются в процессе обучения. Построение границ выполняется статистически на основе дисперсии, присущей данным отдельных классов [3].

Коллективом авторов разработан и внедрен в учебный процесс комплекс лабораторных и практических работ по изучению нейронных сетей на основе проектирования и реализации интерфейса однослойной нейронной сети методами объектно-ориентированного программирования, а также создана простейшая нейросеть, позволяющая распознавать и классифицировать монохромные изображения.

В качестве модели нейрона взята известная модель простого процессорного элемента (рис. 2). На его входы поступает вектор $X = (x_1, \dots, x_n)$ входных сигналов, являющихся выходными сигналами других нейронов, и единичный сигнал смещения [10].

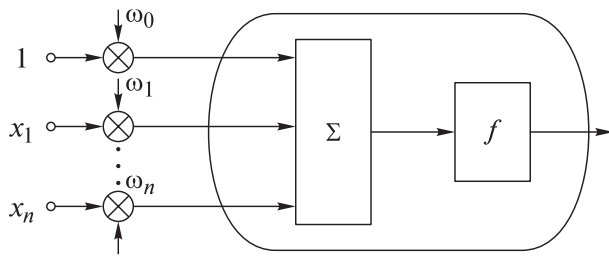


Рис. 2. Процессорный элемент как модель нейрона
Fig. 2. The processor element as a neuron model

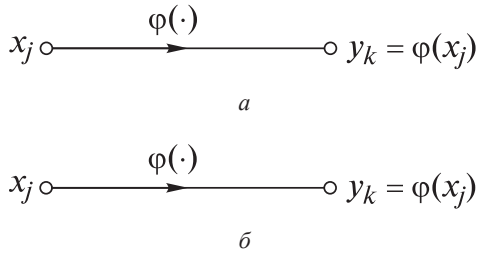


Рис. 3. Граф прохождения сигнала: типы связей (а — активационная связь; б — синаптическая связь)
Fig. 3. Signal flow graph: types of links (a — activation link; b — synaptic link)

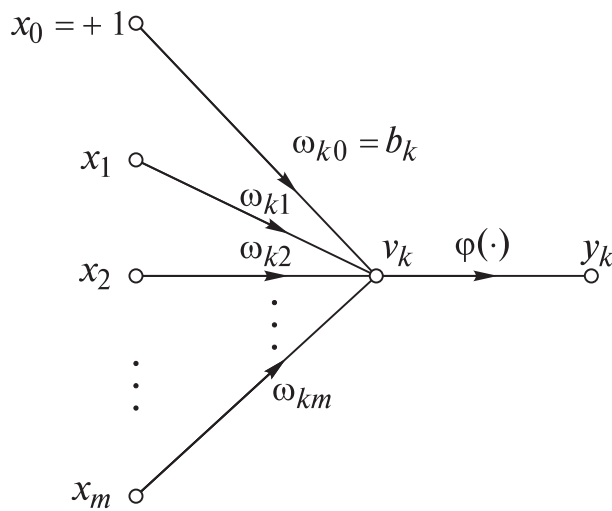


Рис. 4. Граф передачи сигнала для одного нейрона: b_k — порог k -го нейрона; v — индуцированное локальное поле нейрона, т. е. $v_k = \sum_{j=1}^m \omega_{kj} x_j + b_k$

Fig. 4. Signal transmission graph for one neuron: b_k — threshold of the k -th neuron; v — induced local field of the neuron, i.e. $v_k = \sum_{j=1}^m \omega_{kj} x_j + b_k$

Все входные сигналы x_i , включая сигнал смещения ω_0 , умножаются на весовые коэффициенты своих связей ω_i и суммируются:

$$S = \sum_{i=1}^n x_i \omega_i + \omega_0. \quad (1)$$

Полученный сигнал S поступает на вход блока, реализующего функцию активации нейрона. В используемой модели она имеет вид биполярной функции активации

$$y = \begin{cases} 1, & \text{если } S > 0; \\ -1, & \text{если } S \leq 0. \end{cases} \quad (2)$$

Для упрощенного представления моделей нейронных сетей используют направленные графы. Известные варианты графов прохождения сигналов в нейросети представлены на рис. 3 [1].

На рис. 3 φ — в общем случае нелинейная функция активации.

Граф передачи сигнала для одного нейрона представлен на рис. 4.

Как известно, под обучением нейрона следует понимать определенный алгоритм расчета весовых коэффициентов. В используемой модели применялся метод Хебба (рис. 5)

$$\omega_i(t+1) = \omega_i(t) + x_i y, \quad i = 0 \dots n, \quad (3)$$

где $\omega_i(t)$ и $\omega_i(t+1)$ вес i -й связи нейрона до и после адаптации; y — ожидаемый выходной сигнал нейрона, соответствующий классу предъявленного изображения.

Описанная выше математическая модель нейросети реализована в виде компьютерной модели и представлена диаграммой классов (рис. 6).

На основе данной модели на языке C++ в среде Builder C++ разработано учебное приложение «Neural nets are easy», позволяющее успешно решать задачи распознавания монохромных изображений (рис. 7). Используя данное приложение, студенты лучше поймут суть работы нейронных сетей.

Используемая модель нейрона является детерминистской, но легко может быть преобразована в стохастическую, где выходное значение функции активации нейрона будет определяться с некоторой вероятностью

$$y = \begin{cases} 1, & \text{с вероятностью } P(S); \\ -1, & \text{с вероятностью } 1 - P(S), \end{cases} \quad (4)$$

где $P(S)$ является известной сигмоидальной функцией

$$P(S) = \frac{1}{1 + e^{-\frac{S}{T}}}. \quad (5)$$

Параметр T является аналогом температуры и управляет термальными флуктуациями, определяющими эффект синаптического шума.

Следующим этапом развития модели станет ее модификация, позволяющая распознавать и классифицировать мультиспектральные изображения.

В дальнейшем предполагается реализовать аналогичные компьютерные модели для нейронной сети Хемминга и перцептрона Розенблатта, используя адаптацию весов связей с помощью α - и γ -систем подкрепления.

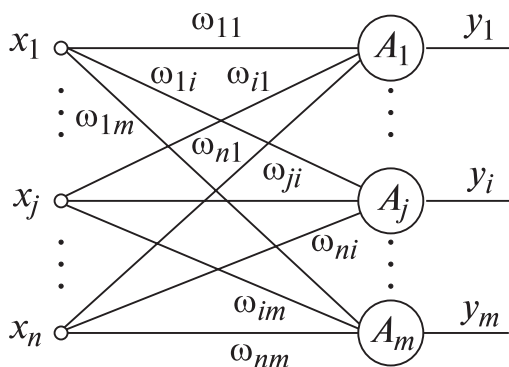


Рис. 5. Нейронная сеть из m -нейронов
Fig. 5. Neural network of m -neurons



Рис. 7. Элементы визуально-компонентного интерфейса разработанного приложения «Neural nets are easy»
Fig. 7. Elements of the visual component interface of the developed application «Neural nets are easy»

Выводы

Нейронные сети прочно вошли в нашу жизнь и используются во многих отраслях науки и техники, поэтому крайне важно подготовить специалистов, которые смогут работать с нейронными сетями.

Создание и внедрение в учебный процесс предлагаемого курса лабораторных и практических работ позволит студентам разобраться в строении нейронных сетей, принципе их создания и работы, существенно расширить свои знания в области прикладного искусственного интеллекта.

Список литературы

[1] Мак-Каллок У.С., Питтс В. Логическое исчисление идей, относящихся к нервной активности // Автоматы / под ред. К.Э. Шеннона, Дж. Маккарти. М.: Изд-во иностр. лит., 1956. С. 363–384.
[2] Нейронные сети: история развития теории. Серия «Нейрокомпьютеры и их применения». Кн. 5 / под ред. А.И. Галушкина, Я.З. Цыпкина. М.: ИПРЖР, 2001. С. 840.

Сведения об авторах

Санников Евгений Владимирович — канд. физ.-мат. наук, Хакасский государственный университет имени Н.Ф. Катанова, sannikoov@yandex.ru

Несмелова Анастасия Сергеевна — инженер-программист, ПАО РКК «Энергия», nesmelovaas@mail.ru

Несмелова Ксения Сергеевна — студентка кафедры систем автоматического управления МГТУ им. Н.Э. Баумана, nesmelovaks@mail.ru

Герасименко Даниил Андреевич — студент кафедры систем автоматического управления, МГТУ им. Н.Э. Баумана, gerbi410001@mail.ru

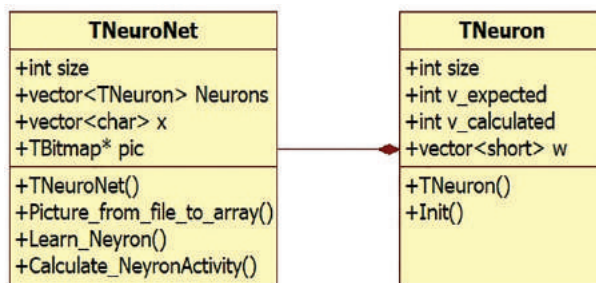


Рис. 6. UML-диаграмма простейшей учебной нейросети TNeuroNet для распознавания монохромных изображений

Fig. 6. UML diagram of the simplest training neural network TNeuroNet for recognition of monochrome images

[3] Хайкин С. Нейронные сети: полный курс = Neural Networks: A Comprehensive Foundation. 2-е изд. М.: Вильямс, 2006. 1104 с.
[4] Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А. Глубокое обучение = Deep Learning. М.: ДМК-Пресс, 2017. 652 с.
[5] Абрамов Н.С., Заднепровский В.Ф., Талалаев А.А., Фраленко А.П. Применение искусственных нейронных сетей в задачах контроля и диагностики подсистем космических аппаратов // Современные проблемы науки и образования, 2014, № 3. С. 62.
[6] Исматова Х.Р. Нейронная экспертная система для анализа и картирования процессов засорения почв по данным дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2006. Т. 3. № 2. С. 320–329.
[7] Игнатъев Д.И. Применение искусственных нейронных сетей для моделирования нестационарных аэродинамических характеристик // Вестник московского авиационного института, 2010. Т. 17. № 6. С. 1.
[8] Хлопков Ю.И., Дорофеев Е.А., Зезя Мью, Полякова М.С., Хлопков А.Ю., Агаева Илаха. Разработка нейронных сетей для расчета аэродинамических характеристик высокоскоростных летательных аппаратов // Фундаментальные исследования, 2013, № 11–9. С. 1834–1840.
[9] Гамбарова Е.М. Применение нейронных сетей для распознавания пространственных данных на космических снимках IKONOS // Информация и космос, 2007, № 4. С. 83–91.
[10] Дмитриенко В.Д., Заковоротный А.Ю. Архитектуры и алгоритмы функционирования нейронных сетей Хемминга и Хебба, способных дообучаться и распознавать новую информацию // Радиоэлектроника, информатика, управление, 2014, № 2 (31). С. 100–109.

Поступила в редакцию 19.04.2019.
Принята к публикации 15.07.2019.

DEVELOPMENT OF LABORATORY AND PRACTICAL WORKS COMPLEX TO STUDY NEURAL NETWORKS

E.V.Sannikov¹, A.S. Nesmelova², K.S. Nesmelova³, D.A. Gerasimenko³

¹Khakass state university of N.F. Katanov, 90, Lenin st., 655000, Abakan, Republic of Khakassia, Russia

²S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, 4a, Lenina st., 141070, Korolev, Moscow reg., Russia

³BMSTU, 5, Block 1, 2nd Baumanskaya st., 105005, Moscow, Russia

sannikoov@yandex.ru

In the modern world, neural nets have become an integral part of our life. They are already being used in many spheres of human activity and are constantly being developed. Thus, teaching students to deal with neural nets has become a matter of topical interest. Considering the principles of how simple neural nets function, the article discusses the capabilities of artificial intelligence as well as the approaches to studying it. Well-coordinated work has allowed the authors to devise a university course combining the elements of theory and practice. The course is aimed at mastering students' skills in the field of neural nets. The educational process is built around teaching students to develop and exploit the interface of a single-layer neural net with the methods of object-oriented programming. The authors created a simple neural net allowing to identify and classify monochrome imagery. To imitate the neuron, the well-known central processing element model was chosen. A mathematical model of the neural net was developed and described on the basis of the Hebb's rule. The process of neuron training became possible with the use of the weight coefficient calculation algorithm. The mathematical model was transformed into a computer-based model. This model underlies the creation of a learning appliance called «Neural nets are easy». Written in the C++ programming language, it successfully accomplishes the task of identifying monochrome imagery. This course will deepen students' understanding of the structure of neural nets, the principles of their work and enhance their knowledge of applied artificial intelligence.

Keywords: Neural nets, artificial intelligence, university course

Suggested citation: Sannikov E.V., Nesmelova A.S., Nesmelova K.S., Gerasimenko D.A. *Razrabotka kompleksa laboratornykh i prakticheskikh rabot po izucheniyu neyronnykh setey* [Development of laboratory and practical works complex to study neural networks]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 4, pp. 106–111. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-106-111

References

- [1] Mak-Kallok U.S., Pitts V. *Logicheskoe ischislenie idey, odnosyashchikhsya k nervnoy aktivnost* [Logical Calculus of Ideas Relating to Nervous Activity], *Avtomaty [Automata]*, Ed. K.E. Shannon and J. McCarthy. Moscow: Izd-vo inostr. lit. [Publishing house inostr. Lit.], 1956, pp. 363–384.
- [2] *Neyronnye seti: Istoriya razvitiya teorii. Seriya «Neyrokomp'yutery i ikh primeneniya»* [Neural networks: The history of the development of the theory. A series of "Neurocomputers and their applications"]. Ed. A.I. Galushkin, Ya.Z. Tsympkin. Moscow: IPRZHR, b. 5, 2001, p. 840.
- [3] Khaykin S. *Neyronnye seti: polnyy kurs = Neural Networks: A Comprehensive Foundation* [Neural networks: a full course = Neural Networks: A Comprehensive Foundation]. 2nd ed. Moscow: Williams, 2006, 1104 pp.
- [4] Goodfellow J., Bengio I., Curville A. *Glubokoe obucheniye = Deep Learning* [Deep Learning = Deep Learning]. Moscow: DMK-Press, 2017, 652 p.
- [5] Abramov N.S., Zadneprovskiy V.F., Talalaev A.A., Fralenko A.P. *Primeneniye iskusstvennykh neyronnykh setey v zadachakh kontrolya i diagnostiki podsystem kosmicheskikh apparatov* [The use of artificial neural networks in tasks of monitoring and diagnostics of spacecraft subsystems] *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education], 2014, no. 3, p. 62.
- [6] Ismatova Kh.R. *Neyronnaya ekspertnaya sistema dlya analiza i kartirovaniya protsessov zasoreniya pochv po dannym distantsionnogo zondirovaniya* [Neural expert system for the analysis and mapping of soil clogging processes according to remote sensing data] *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2006, v. 3, no. 2, pp. 320–329.
- [7] Ignat'ev D.I. *Primeneniye iskusstvennykh neyronnykh setey dlya modelirovaniya nestatsionarnykh aerodinamicheskikh kharakteristik* [The use of artificial neural networks for modeling unsteady aerodynamic characteristics] *Vestnik moskovskogo aviatsionnogo instituta* [Bulletin of the Moscow Aviation Institute], 2010, v. 17, no. 6, p. 1.
- [8] Khlopkov Yu.I., Dorofeev E.A., Zeya M'о, Polyakova M.S., Khlopkov A.Yu., Agaeva Ilakha *Razrabotka neyronnykh setey dlya rascheta aerodinamicheskikh kharakteristik vysokoskorostnykh letatel'nykh apparatov* [Development of neural networks for calculating the aerodynamic characteristics of high-speed aircraft] *Fundamental'nye issledovaniya* [Basic Research], 2013, no. 11–9, pp. 1834–1840.
- [9] Gambarova E.M. *Primeneniye neyronnykh setey dlya raspoznavaniya prostranstvennykh dannykh na kosmicheskikh snimkakh IKONOS* [The use of neural networks for recognition of spatial data on IKONOS satellite images] *Informatsiya i kosmos* [Information and space], 2007, no. 4, pp. 83–91.
- [10] Dmitrienko V.D., Zakovorotnyy A.Yu. *Arkhitektury i algoritmy funktsionirovaniya neyronnykh setey Khemminga i Khebb, sposobnykh doobuchat'sya i raspoznavat' novuyu informatsiyu* [The architectures and algorithms of the functioning of the Hamming and Hebb neural networks capable of further learning and recognizing new information] *Radioelektronika, informatia, upravliniya* [Radioelectronics, informatics, control], 2014, no. 2 (31), pp. 100–109.

Authors' information

Sannikov Evgeniy Vladimirovich — Cand. Sci. (Ph.-M.) of the Khakass state university of N.F. Katanov, sannikoov@yandex.ru

Nesmelova Anastasiya Sergeevna — Engineer of the S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, nesmelovaas@mail.ru

Nesmelova Kseniya Sergeevna — Student of Department Automatic control system of the BMSTU, nesmelovaks@mail.ru

Gerasimenko Daniil Andreevich — Student of Department Automatic control system, of the BMSTU, gerbi410001@mail.ru

Received 19.04.2019.

Accepted for publication 15.07.2019.

ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ БАЙЕСОВСКОГО ПОДХОДА И Z-ЧИСЕЛ

О.М. Полещук, Н.Г. Поярков, С.В. Тумор

МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

tumor.sergey@mail.ru

Предлагается модель поддержки принятия решений на основе понятия Z-числа и байесовского подхода. Авторы рассматривают частный случай Z-чисел, второй компонентой которых является нечеткое расширение вероятностных распределений. Подобная модель позволяет учитывать два типа неопределенности — нечеткость и случайность, а также достоверность полученной информации, которую обеспечивает вторая компонента Z-чисел. При использовании в задачах принятия решений только Байесовского подхода возникает проблема в тех случаях, когда неизвестны точные значения априорных вероятностей. Чтобы ликвидировать этот пробел, в статье используются Z-числа, которые позволяют найти оценки неизвестных вероятностей с определенной степенью достоверности (надежности). Эти оценки являются нечеткими расширениями некоторых вероятностных распределений, оперирование с которыми происходит на основе принципа расширения профессора Лотфи Заде. В статье приводится пример работы описанной модели поддержки принятия решений в условиях неопределенности смешанного характера, который подтверждает ее эффективность.

Ключевые слова: метод Байеса, Z-число, вычисление со словами, принятие решений

Ссылка для цитирования: Полещук О.М., Поярков Н.Г., Тумор С.В. Принятие решений на основе байесовского подхода и Z-чисел // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2019. Т. 23. № 4. С. 112–116. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-112-116

В течение более четырех десятилетий разрабатываются системы поддержки принятия решений в условиях неопределенности разных типов. Байесовские методы принятия решений используют теорию вероятностей для обработки неопределенности случайного характера и широко применяются в различных областях для анализа, прогноза и поддержки принятия решений. Вычисления со словами используют теорию нечетких множеств для обработки неопределенности нечеткого характера. В случае наличия неопределенности смешанного характера необходимо объединение возможностей обоих подходов, которое бы усилило аппарат каждой из теорий. Попыткой продвижения в этом направлении было определение профессором Лотфи Заде понятия Z-числа, которое позволило формализовать высказывания в рамках естественного языка и определить меру их достоверности. Данная работа посвящена дальнейшему развитию подхода, объединяющему метод Байеса и аппарат вычислений со словами.

Цель работы

В работе приводится пример объединения Z-числа и байесовской теории для обеспечения поддержки принятия решений, когда точные значения всех параметров и вероятностей недоступны. Подобный гибридный подход обеспечивает систему поддержки принятия решений в условиях неопределенности смешанного типа.

Чтобы определить достоверность или надежность нечеткой информации была введена кон-

цепция Z-числа [1]. Z-число описывает значение некоторой нечеткой переменной X и представляет собой упорядоченную пару двух нечетких чисел $Z = (A, B)$. Первое число (A) является ограничением на значения переменной X (это ограничение может быть представлено в короткой форме « X есть A »), а второе число B — является нечетким ограничением на степень уверенности в первом числе A , т. е. оценка надежности A . В большинстве случаев нечеткие числа A и B описываются фразами естественного языка, например $Z = (\text{меньше } 60, \text{ абсолютно уверен})$, и формально представляются как трапециевидальные или треугольные функции принадлежности.

В «вычислениях со словами» (computing with words CW) [2] предложена методология представления человеческих знаний таким образом, чтобы машины могли делать собственные выводы на их основе. «Вычисления со словами» обусловлены способностью человека выполнять различные задачи и принимать решения без применения явных вычислений и измерений. Эта способность позволяет упростить процесс принятия решения человеком. Например, когда человек едет на автомобиле, ему не нужно измерять точное расстояние до препятствия, чтобы объехать его. Он просто проследит приблизительное расстояние и посмотрит, слишком ли он близок к препятствию или достаточно далек от него. Точно так же значительный объем человеческих знаний представлен словами и формами нечетких измерений и приближений. Некоторые проблемы изложены и решены с использованием этих

неточных и приближительных форм [3]. Слова естественного языка можно смоделировать путем применения теории нечетких множеств и методов приближенных рассуждений, которые составляют основу попыток «вычислений со словами». Концепция «вычислений со словами», представленная Лотфи Заде [4], расширила область применения нечеткой логики еще дальше, появилась возможность решать более сложные проблемы. Аппарат нечеткой логики интерпретирует слова естественного языка в виде некоего нечеткого множества, каждое значение которого подчинено определенной функции принадлежности. Предположим, что переменная X = «расстояние», поэтому утверждение « X меньше 60 (м)» в рамках Z -числа оценивается как очень надежное (B = «абсолютно уверен»). Z -числа позволяют учитывать знания и достоверность (надежность) любого предложения, высказанного экспертом.

Преимущество Z -чисел заключается в их способности работать с нечеткими значениями случайных величин и их вероятностями. Традиционные методы, такие, как байесовская теория принятия решений [5] — одна из наиболее популярных методологий принятия решений, применимы только к точным значениям и вероятностям (точным параметрам функций плотности).

В работе рассмотрен пример использования Z -чисел для улучшения байесовской теории принятия решений с возможностью обработки неточных измерений, когда точные распределения вероятностей недоступны, а также иллюстрация гибридной методологии, объединяющей «вычисления со словами» и Z -числами с байесовской теорией принятия решений, которая сочетает в себе нечеткие и байесовские подходы для решения проблем поддержки / принятия решений, если точные вероятности событий и результатов недоступны.

Ранее были предприняты некоторые попытки принятия решений с использованием Z -оценок [6] и Z -информации [7], но эти подходы предполагают наличие данных о параметрах и/или типе функций распределения вероятности, которые должны быть известны.

Необходимые понятия и определения

Более двух десятилетий тому назад Заде ввел концепцию «вычислений со словами» (CS) [4], интерпретирующую предложения на естественном языке как отношение между лингвистической переменной (V) и лингвистическим термом (T). Таким образом, терм T накладывает ограничения на возможные значения V . Это отношение называется *обобщенным ограничением* (generalized constraint GC) и показывает возможность того,

что V примет значение, принадлежащее терму T . Концепция GC является центральной в «вычислениях со словами», она позволяет формализовать фразы естественного языка и проводить над ними вычисления. Понятие Z -числа (числа Заде) — следующий этап развития нечеткой логики, оно позволяет учитывать надежность и достоверность обобщенного ограничения и интерпретировать его как ограничение на нечеткую вероятность [1].

Приведем необходимые понятия и определения.

Вероятность нечеткого события A в пространстве высказывания U с функцией принадлежности μ_A и плотностью распределения вероятностей p можно выразить интегралом

$$P(A) = \int_U \mu_A(u) p(u) du$$

или в случае дискретного распределения p

$$P(A) = \sum_U \mu_A(u) p(u).$$

Профессор Лотфи Заде определяет объединение нечетких событий как произведение их функций принадлежности. Следовательно, независимость нечетких событий можно определить подобно четким событиям. Используя произведение нечетких событий ($A_1 A_2$) в качестве их объединения, профессор Заде ввел понятие условной вероятности нечетких событий, аналогичное понятию условной вероятности:

$$P(A_1 | A_2) = \frac{P(A_1 A_2)}{P(A_2)}.$$

Основываясь на этом определении, правило Байеса для вероятности двух нечетких событий записываем в виде:

$$P(A_1 | A_2) = \frac{P(A_2 | A_1) P(A_1)}{P(A_2)},$$

где $\mu_{A_1 A_2} = \mu_{A_1} \mu_{A_2}$.

Z -число является упорядоченной парой нечетких чисел $Z = (A, B)$ [1]. В этой паре A — ограничение на значения некоторой переменной X (X есть A), а B представляет собой оценку уверенности в том, что X есть A . Например: $Z =$ (население России около 146 млн чел., уверен). Позднее было предложено понятие Z^+ -числа. Оно представляет собой сочетание нечеткого числа A и случайного числа R и записывается в виде упорядоченной пары $Z^+ = (A, R)$. В этой паре A имеет то же значение, что и в Z -числе, а R является распределением вероятностей случайной величины X .

При непрерывном Z -числе, его можно выразить через интеграл

$$\int_U \mu_A(u) p_X(u) du \text{ есть } B,$$

где p_X — неизвестная функция плотности распределения вероятности X .

В байесовской теории принятия решений вероятность гипотезы и вероятность наблюдения используются для расчета вероятности исхода события. Пусть имеется n гипотез, когда искомое событие A при одной из гипотез B_i $1 < i < n$ наступает, то вычисляют апостериорные вероятности (полученные после опыта) $P(B_i|A)$, позволяющие сделать вывод о правильности априорных (доопытных) вероятностей и переоценить их. Помогает в этом формула Байеса

$$P(B_i|A) = \frac{P(B_i A)}{P(A)} = \frac{P(A|B_i) \cdot P(B_i)}{\sum_{i=1}^n P(A|B_i) \cdot P(B_i)}$$

Если возможны m решений (decision) d_k , $1 < k < m$, когда событие A наступило и потеря (например, времени), связанная с каждым решением, есть функция $l(d_k|B_i)$, тогда общую ожидаемую потерю (ОП) можно вычислить из уравнения

$$ОП(d_k|A) = \sum_i l(d_k|B_i) P(B_i|A)$$

Функция потерь — это функция, которая в теории статистических решений характеризует потери при неправильном принятии решений на основе наблюдаемых данных. Из-за случайности наблюдаемых данных принятое решение (оценка) γ может не совпадать с истинным значением оцениваемого параметра l . Очевидно, что ошибки зависят от выбранного правила принятия решений. Качество принимаемых решений характеризуется функцией потерь $C(\gamma, l)$, которую выбирают так, чтобы $C(\gamma, l) \geq 0$, где нулевым значениям соответствуют правильные решения.

Байесовское правило принятия решений говорит о том, что нужно минимизировать ожидаемую потерю и выбрать то решение из m , которое приводит к этому минимуму

$$d = \arg \min_{d_k} ОП(d_k|A)$$

Для сравнения Z -чисел в работе используется понятие взвешенного среднего значения (ВС), которое определяется следующим образом

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i}$$

В случае $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$ формула приобретет вид

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot x_i$$

Принятие решений на основе байесовской теории и Z -чисел. Рассмотрим пример интеграции Z -чисел с классическим байесовским подходом [8]. Нечеткое высказывание обобщаем: «Гражданину требуется попасть из города А в город Б». У него есть несколько вариантов. В зависимости от погодных условий гражданин принимает один из них:

на собственном автомобиле:
если не идет дождь, поездка часто занимает около 3 ч;
если идет дождь, поездка займет, может быть, около 5 ч;

на поезде:
если нет дождя, поездка почти наверное займет около 3,5 ч;
если идет дождь, поездка часто занимает около 4 ч.

Согласно задаче, уже известны следующие вероятности:

P (идет дождь) = 0,7 — *вероятно*;
 P (поездка на автомобиле) = 0,75 — *обычно*;
 P (около 3 ч | нет дождя, автомобиль) — *часто*;
 P (около 3,5 ч | нет дождя, поезд) — *почти наверное*;
 P (около 5 ч | дождь, автомобиль) — *может быть*;
 P (около 4 ч | дождь, поезд) — *часто*.

В данном примере необходимо рассчитать ожидаемую потерю времени пассажиром при поездке на автомобиле или на поезде. Для этого требуется вычислить 16 вероятностей и ОП для каждого вида транспорта:

P (около 4 ч, дождь, поезд) — ?
 P (около 4 ч, дождь, автомобиль) — ?
...
 P (дождь, поезд | около 4 ч) — ?
 P (дождь, автомобиль | около 4 ч) — ?
...
ОП (автомобиль) — ?
ОП (поезд) — ?

В байесовской теории предполагается, что вероятности — это известные величины. Но при использовании Z -чисел необязательно заранее знать все вероятности. Можно аппроксимировать неизвестные вероятности, применяя аппарат нечетких множеств [9, 10].

Согласно байесовскому подходу, совместная вероятность в нашем примере вычисляется следующим образом:

$$P(\text{около 4 ч, дождь, поезд}) = P(\text{около 4 ч} | \text{поезд, дождь}) P(\text{поезд}) P(\text{дождь}). \quad (1)$$

Чтобы формализовать нечеткие числа, такие, как *часто*, *нечасто*, *может быть*, воспользуемся правилом, определяющим пересечение нечетких множеств [9]:

$$\mu_{(\text{около 4 ч, дождь, поезд})}(p_4) = \sup_{p_4} \min \left\{ \mu_{(\text{часто})}(p_1), \mu_{(\text{не часто})}(p_2), \mu_{(\text{может быть})}(p_3) \right\} \quad (2)$$

при условии $p_4 = p_1 p_2 p_3$ и $0 \leq p_4 \leq 1$.

Чтобы рассчитать вероятность P (около 4 ч) воспользуемся формулой [8]:

$$P(E) = P(E, A, B) + P(E, \bar{A}, B) + P(E, A, \bar{B}) + P(E, \bar{A}, \bar{B}), \quad (3)$$

где \bar{A} и \bar{B} — это дополнения событий соответственно A и B .

Таким образом,

$$\begin{aligned} P(\text{около 4 ч}) &= \\ &= P(\text{около 4 ч, автомобиль, дождь}) + \\ &+ P(\text{около 4 ч, поезд, дождь}) + \\ &+ P(\text{около 4 ч, автомобиль, нет дождя}) + \\ &+ P(\text{около 4 ч, поезд, нет дождя}). \end{aligned} \quad (4)$$

Апостериорные вероятности рассчитываются на основе совместных вероятностей по известной формуле

$$P(B, C | A) = \frac{P(A, B, C)}{P(A)}. \quad (5)$$

Можно вычислить знаменатель апостериорной вероятности, $P(A)$, используя формулы (2), (3) и нечеткую арифметику. Если $P(A, B, C) = P_1$ и $P(A) = P_2$, то $P(B, C | A) = P_3$. Далее воспользуемся правилом, определяющим пересечение нечетких множеств:

$$\mu_{P_3}(p_3) = \sup_{p_3} \min\{\mu_{P_1}(p_1), \mu_{P_2}(p_2)\} \quad (6)$$

при условии $P_3 = \frac{P_1}{P_2}$ и $0 \leq p_3 \leq 1$.

Пример отыскания апостериорной вероятности в нашей задаче:

$$\begin{aligned} P(\text{поезд, дождь} | \text{около 4 ч}) &= \\ &= \frac{P(\text{около 4 ч, поезд, дождь})}{P(\text{около 4 ч})}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $P(\text{около 4 ч, дождь, поезд})$ вычисляется согласно формулам (1), (2) и $P(\text{около 4 ч})$ вычисляется согласно формуле (4).

Чтобы вычислить ОП времени при поездке на поезде или автомобиле, соответствующую апостериорную вероятность следует умножить на функцию потери и просуммировать получившиеся произведения. Это нечеткая операция и выполняется согласно правилам, определяющим арифметические операции над нечеткими числами. Функция потерь в данном случае представляет собой время в пути. Таким образом,

$$\text{ОП}(N) = \sum_i l_{iN} P_i,$$

где l_{iN} — это ожидаемая потеря времени при i -м условии поездки; N — общее количество условий.

Для выбора наилучшего варианта необходимо сравнить полученные значения, например, используя ранжирование Z -чисел [7] или ВС.

Наконец, получаем: $\text{ВС}(\text{ОП}(\text{автомобиль})) = 0,69$; $\text{ВС}(\text{ОП}(\text{поезд})) = 0,71$.

Поскольку взвешенное среднее варианта поездки на поезде выше, то следует выбирать этот вариант. Полученный результат совпадает с полученным только с использованием метода Байеса [8].

Выводы

Показано преимущество подхода, объединяющего метод Байеса и аппарат «вычислений со словами», к решению задач принятия решений, заключающееся в возможности обработки информации в условиях неопределенности смешанного типа и отсутствии необходимости знания всех точных апостериорных вероятностей альтернатив. Рассмотренный подход находится в стадии развития, но тем не менее на практике подтвердил свою актуальность и эффективность, несмотря на наличие такого недостатка, как сложность вычислений при проведении операций с Z -числами [7], а также отсутствие единого метода ранжирования Z -чисел и альтернатив на их основе. Приведенный в работе практический пример поддержки принятия решений на основе Z -чисел и байесовской теории также подтвердил эффективность подобного гибридного подхода в условиях неопределенности смешанного типа.

Список литературы

- [1] Zadeh L.A. A note on Z -numbers // Inf. Sci., 2011, v. 181, pp. 2923–2932.
- [2] Zadeh L.A. Computing with words and perceptions – a paradigm shift // Proc. of the Int. Conf. on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications, PDPTA 2010, Las Vegas, Nevada, USA, July 12–15, 2010, 2 vols., 2010, pp. 3–5.
- [3] Полещук О.М., Тумор С.В. Использование Z -чисел (чисел Заде) для поддержки принятия решений // Сб. докл. XV Ежегодной Междунар. науч.-техн. конф. «IT-технологии: развитие и приложения», Владикавказ, Северо-Кавказский горно-металлургический институт, 12–14 декабря 2018 г. Владикавказ, 2018. 340 с.
- [4] Zadeh L. Fuzzy logic computing with words // IEEE Trans. Fuzzy Syst., 1996, no. 4, pp. 103–111.
- [5] Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен / пер. с англ. Г.Г. Вайштейна, А.М. Васильковского, под ред. В.Л. Стефанюка. М.: Мир, 1976. 509 с.
- [6] Yager R.R. On Z -valuations using Zadeh's Z -numbers // Int. J. Intell. Syst., 2012, no. 27, pp. 259–278.
- [7] Aliev R.A., Huseynov O.H., Aliyev R.R., Alizadeh A.A. The Arithmetic of Z -Numbers: Theory and Applications. NJ, USA: World Scientific Publishing Co., Inc., River Edge, 2015. 300 p.
- [8] Marhamati N., Buxton E.K., Rahimi Sh. Integration of Z -numbers and Bayesian decision theory: A hybrid approach to decision making under uncertainty and imprecision // Applied Soft Computing, 2018, no. 72, pp. 273–290.
- [9] Zadeh L.A. Toward a generalized theory of uncertainty (GTU): an outline // Inf. Sci. Inf. Comput. Sci., 2005, v. 172, pp. 1–40.
- [10] Patel P., Khorasani E., Rahimi S. Modeling and implementation of Z -number // Soft Comput., 2015, v. 20 (4), pp. 1–24.

Сведения об авторах

Полещук Ольга Митрофановна — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой высшей математики и физики МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), olga.m.pol@yandex.ru

Поляков Николай Геннадьевич — канд. техн. наук, доцент, декан Космического факультета МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), poyarkov@mgul.ac.ru

Тумор Сергей Владимирович — аспирант, ассистент кафедры высшей математики и физики МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), tumor.sergey@mail.ru

Поступила в редакцию 19.04.2019.

Принята к публикации 15.07.2019.

DECISION-MAKING BASED ON BAYESIAN THEORY AND Z-NUMBERS

O.M. Poleschchuk, N.G. Poyarkov, S.V. Tumor

BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

tumor.sergey@mail.ru

A decision support model based on the concept of Z-number and the Bayesian approach is proposed. The authors consider a special case of Z-numbers, the second component of which is a fuzzy extension of probability distributions. Such a model allows to take into account two types of uncertainty fuzziness and randomness, as well as the reliability of the information received, which provides the second component of Z-numbers. When using only the Bayesian approach in decision-making problems, a problem arises in cases where the exact values of a priori probabilities are unknown. To fill this gap, the article uses Z-numbers, which allow to find estimates of unknown probabilities with a certain degree of reliability (reliability). These estimates are fuzzy extensions of some probability distributions, which are operated on the basis of the extension principle of Professor Lotfi Zadeh. The article gives an example of the described decision support model in a mixed environment of uncertainty, which confirms its effectiveness.

Keywords: Bayesian method, Z-number, calculation with words, decision making

Suggested citation: Poleschchuk O.M., Poyarkov N.G., Tumor S.V. *Prinyatie resheniy na osnove bayesovskogo podkhoda i Z-chisel* [Decision-making based on bayesian theory and Z-numbers]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 4, pp. 112–116. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-112-116

References

- [1] Zadeh L.A. A note on Z-numbers // *Inf. Sci.*, 2011, v. 181, pp. 2923–2932.
- [2] Zadeh L.A. Computing with words and perceptions – a paradigm shift // *Proc. of the Int. Conf. on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications, PDPTA 2010, Las Vegas, Nevada, USA, July 12–15, 2010, 2 vols.*, 2010, pp. 3–5.
- [3] Poleschchuk O.M., Tumor S.V., *Ispol'zovanie Z-chisel (chisel Zade) dlya podderzhki prinyatiya resheniy* [Using Z-numbers (Zade numbers) for decision-making support] *Sbornik dokladov XV Ezhegodnoy Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «IT-tehnologii: razvitie i prilozheniya»* [Collection of reports of the XV Annual International Scientific and Technical Conference «IT-technologies: development and applications»], Vladikavkaz, North Caucasus Institute of Mining and Metallurgy, December 12–14, 2018. Vladikavkaz, 2018. 340 p.
- [4] Zadeh L. Fuzzy logic computing with words. *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, 1996, no. 4, pp. 103–111.
- [5] Duda R., Hart P. *Raspoznavanie obrazov i analiz stszen* [Pattern Recognition and Scene Analysis]. Trans. from English G.G. Vayeshteina, A.M. Vaskovsky. Ed. V.L. Stefanuk. Moscow: Mir, 1976, 509 p.
- [6] Yager R.R. On Z-valuations using Zadeh's Z-numbers. *Int. J. Intell. Syst.*, 2012, no. 27, pp. 259–278.
- [7] Aliev R.A., Huseynov O.H., Aliyev R.R., Alizadeh A.A. *The Arithmetic of Z-Numbers: Theory and Applications*. NJ, USA: World Scientific Publishing Co., Inc., River Edge, 2015. 300 p.
- [8] Marhamati N., Buxton E.K., Rahimi Sh. Integration of Z-numbers and Bayesian decision theory: A hybrid approach to decision making under uncertainty and imprecision. *Applied Soft Computing*, 2018, no. 72, pp. 273–290.
- [9] Zadeh L.A. Toward a generalized theory of uncertainty (GTU): an outline. *Inf.Sci. Inf. Comput. Sci.*, 2005, v. 172, pp. 1–40.
- [10] Patel P., Khorasani E., Rahimi S. Modeling and implementation of Z-number. *Soft Comput*, 2015, v. 20 (4), pp. 1–24.

Authors' information

Poleschchuk Ol'ga Mitrofanovna — D-r Sci. (Tech.), Professor, Head of Higher Mathematics and Physics Department of BMSTU (Mytishchi branch), olga.m.pol@yandex.ru

Poyarkov Nikolay Gennad'evich — Cand. Sci. (Tech.), Head of Space Department of BMSTU (Mytishchi branch), poyarkov@mgul.ac.ru

Tumor Sergey Vladimirovich — pg., assistant at the Department of Higher Mathematics and Physics, BMSTU (Mytishchi branch), tumor.sergey@mail.ru

Received 19.04.2019.

Accepted for publication 15.07.2019.

О ПОСТРОЕНИИ СЕТИ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ В НЕПОДГОТОВЛЕННЫХ В ОТНОШЕНИИ СВЯЗИ РАЙОНАХ

А.Н. Дмитриев¹, В.А. Есаков¹, Г.С. Уткин¹, В.Н. Сумельтинов¹,
Ю.И. Литвяк¹, М.Ю. Стогов²

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

²ЦНИИ ВВС МО РФ, 141103, Московская область, г. Щелково, ул. Аэродромная, д. 2–5

alexmitriev007@yandex.ru

Рассмотрена задача оптимального размещения аэростатных ретрансляторов в интересах построения сети беспроводной связи. Предложен способ решения этой задачи, основанный на последовательном связывании исходного графа сети аэростатными ретрансляторами различной высоты и стоимости. Проведено сравнение полученных результатов и выбран наиболее эффективный из них. Лучшим признан тип ретрансляторов, которым можно обеспечить полную связность исходного графа сети с минимальными затратами, выраженными в суммарной стоимости потребного количества аэростатных ретрансляторов. Представлен алгоритм поиска оптимального решения, реализованный на языке программирования Python 2.7. Определен оптимальный для исходных данных тип аэростатного ретранслятора, описан процесс его поиска.

Ключевые слова: сеть беспроводной связи, аэростат, оптимизация

Ссылка для цитирования: Дмитриев А.Н., Есаков В.А., Уткин Г.С., Сумельтинов В.Н., Литвяк Ю.И., Стогов М.Ю. О построении сети беспроводной связи в неподготовленных в отношении связи районах // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2019. Т. 23. № 4. С. 117–124. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-117-124

Сети беспроводной связи имеют все более важное значение в современных системах телекоммуникаций, поскольку обладают высокой экономичностью, широким спектром применения, что ставит перед исследователями ряд задач по повышению их эффективности.

Отдельный класс беспроводных сетей представляют сети связи, построенные с использованием ретрансляторов связи на базе летательных аппаратов. Как транспортная база могут служить аэростаты, миниатюрные беспилотные летательные аппараты (БПЛА), дирижабли, самолеты или искусственные спутники Земли. Ретрансляторы связи обеспечивают существенное расширение области покрытия радиосвязью территории и пространства, называемого радиосвязным полем. Поэтому приобрели актуальность задачи разработки и внедрения в практику методических аспектов построения сети связи, использующей ретрансляторы на базе летательных аппаратов различного типа.

Цель работы

Целью настоящей работы является создание целостной методики, обеспечивающей построение беспроводной сети связи в неподготовленных в отношении связи районах на основе применения аэростатных ретрансляторов связи различной высоты.

Материалы и методы

Теоретической и методической основой решения задачи оптимального размещения аэростатных ретрансляторов являются такие методы, как

системный анализ, оценка качества и эффективности, оптимизация и математическое программирование [1–9].

Немаловажное значение имеют методы моделирования авиационных сетей информационного обмена, оценки их качества и эффективности [10–18].

Разработаны предложения по повышению эффективности систем авиационной и наземной радиосвязи на основе применения ретрансляторов на различных летно-подъемных средствах [19] и метод оптимального размещения аэростатных ретрансляторов связи в интересах построения сети беспроводной связи в неподготовленных в отношении связи районах [20], используемые нами для решения рассматриваемой практической задачи.

В общем случае эффективность функционирования сети связи характеризуется двумерным показателем [9], включающим в себя следующие параметры:

1) показатель качества, в данном случае отражающий обеспечение связности каждого абонента сети хотя бы с одним из соседних абонентов с учетом требований по достоверности и своевременности передачи информации (прямая задача);

2) затраты на организацию такой сети, которые выражаются в конкретных физических величинах, например стоимость требуемого оборудования E (обратная задача).

Задача оптимального размещения аэростатных ретрансляторов относится к классу задач об оптимальном покрытии. Построение такой сети связи достигается решением либо прямой, либо обратной оптимизационной задачи.

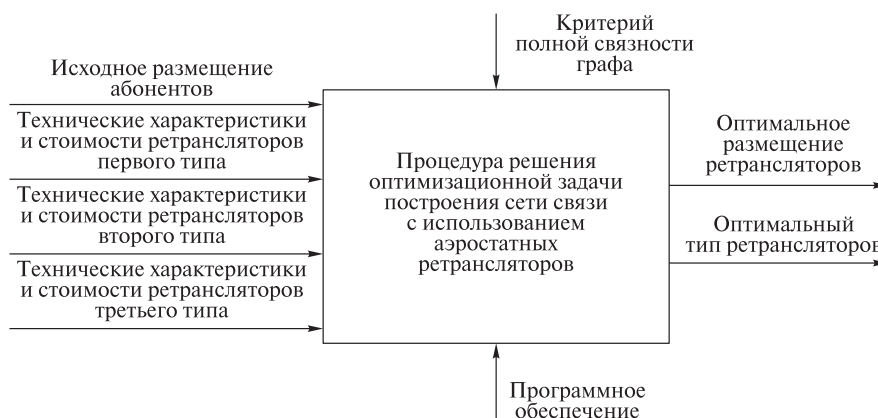


Рис. 1. Процедура решения оптимизационной задачи построения сети связи с использованием аэростатных ретрансляторов

Fig. 1. The procedure for solving the optimization problem of constructing a communication network using balloon repeaters

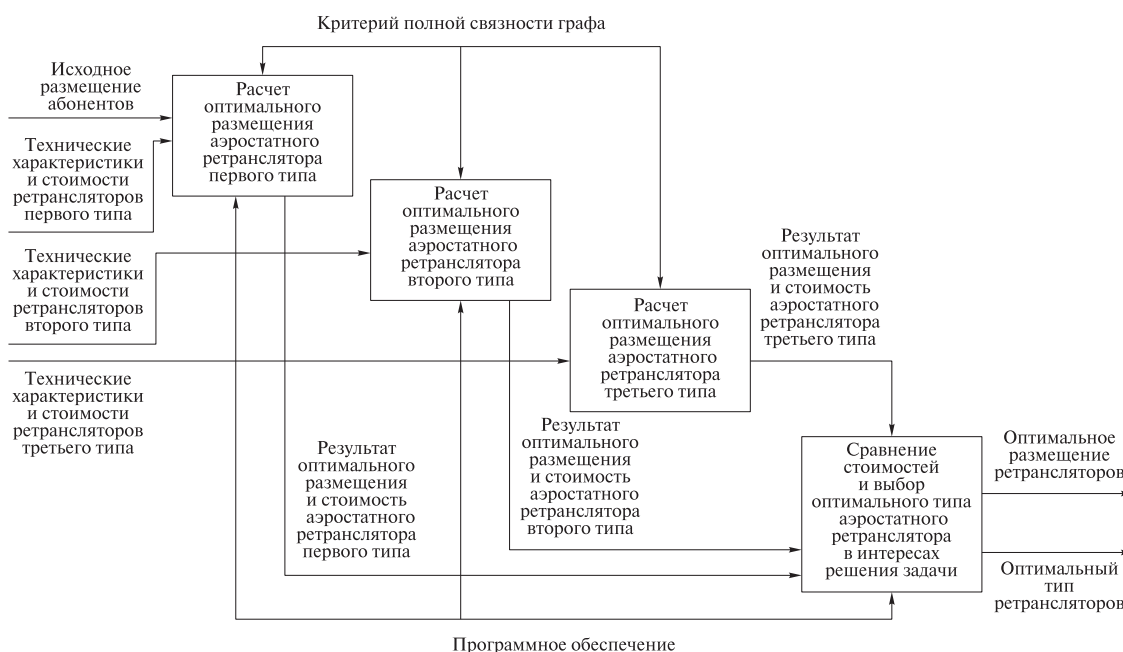


Рис. 2. Декомпозиция процедуры решения оптимизационной задачи построения сети связи с использованием аэростатных ретрансляторов (АРТР)

Fig. 2. Decomposition of the procedure for solving the optimization problem of building a communication network using balloon repeaters

Результаты и обсуждение

При использовании радиосвязного и коммутационного оборудования с одинаковыми характеристиками наибольшее влияние на стоимость построения сети оказывает высотность аэростатных ретрансляторов.

С точки зрения максимальной высоты подвеса, множество аэростатных ретрансляторов можно разделить на три типа T (с высотностями h_1, h_2, h_3 и стоимостью в условных единицах e):

$T_1 = \{h_1, e_1\}$ — маловысотные: $h_1 = 300$ м, $e_1 = 1000$ у.е.;

$T_2 = \{h_2, e_2\}$ — средневысотные: $h_2 = 1000$ м, $e_2 = 1500$ у.е.;

$T_3 = \{h_3, e_3\}$ — высотные: $h_3 = 3000$ м, $e_3 = 10\,000$ у.е.

Согласно работе [2], оптимизация состоит в выборе наилучшей пары R и E , где R — ресурсы, E — результат.

Для заданного множества ретрансляторов высотности h_1, h_2, h_3 , используемых для построения сети, и их стоимости $E_{300}, E_{1000}, E_{3000}$ соответственно требуется определить такую совокупность ретрансляторов различных типов, которая обеспечивает решение задачи о покрытии с минимальной суммарной стоимостью (рис. 1, 2)

$$E = \min E_{\Sigma} \text{ для } E \in \{E_{300}, E_{1000}, E_{3000}\}.$$



Рис. 3. Расчет оптимального размещения аэростатных ретрансляторов первого типа
 Fig. 3. Calculation of the optimal placement of the balloon type repeaters of the first type

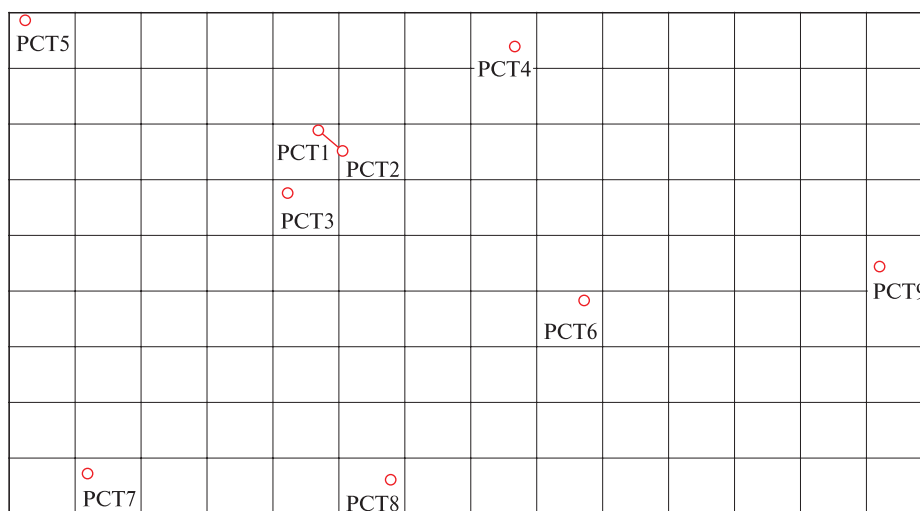


Рис. 4. Исходное размещение абонентов (радиостанций) в координатной сетке (количество PCT — 9)
 Fig. 4. The initial placement of subscribers (radio stations) in the grid (the number of PCT — 9)

На рис. 3 отражено графическое представление процедуры расчета оптимального размещения аэростатных ретрансляторов на примере аэростатного ретранслятора первого типа T_1 .

Для решения данной задачи разработана программа на языке Python 2.7.

Исходными данными для программы послужили множество абонентов A_{PCT} (рис. 4), представленных координатами в двумерном пространстве, и множество доступных типов аэростатов — R , представленных максимальной высотой подвеса в метрах h и стоимостью e в условных единицах.

В процессе выполнения программы по алгоритму [2] выполняется поиск минимального потребного количества аэростатных ретрансляторов каждого типа T_i , необходимого для достижения приемлемого значения первого показателя качества, то есть полной связности графа и подсчет суммарной стоимости аэростатного ретранслятора. Оптимальным признается решение с минимальной суммарной стоимостью ретрансляторов.

Результаты поиска для ретрансляторов с высотой подвеса 300, 1000 и 3000 м отражены на рис. 5–7 соответственно.

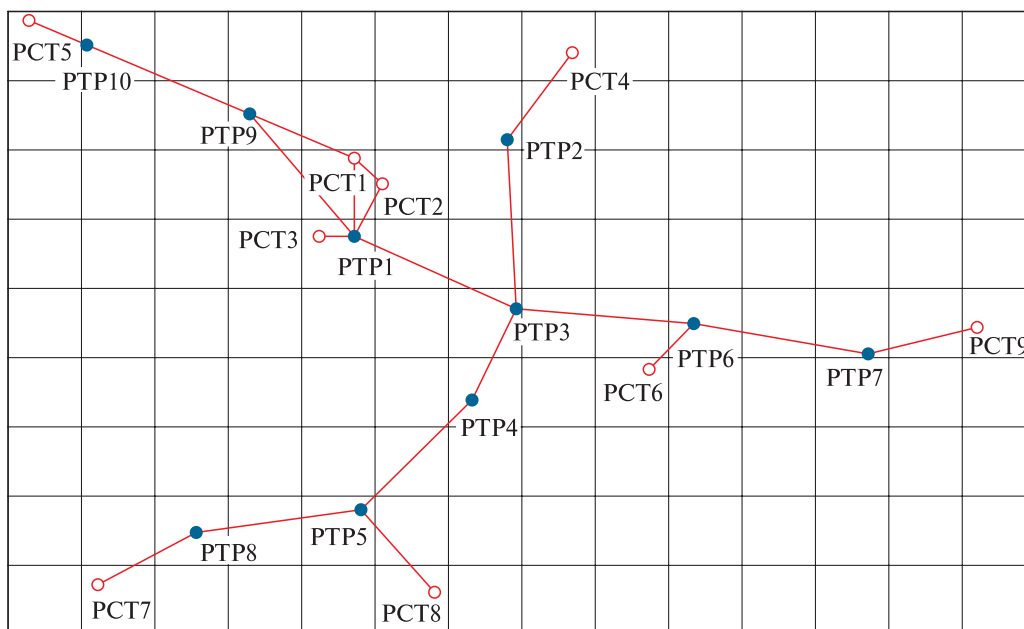


Рис. 5. Оптимальное решение для аэростатных ретрансляторов с высотой подвеса 300 м (масштаб 1:600; высота 300 м; стоимость 1000 у.е.; количество каналов связи (КС) — 1; количество радиостанций (PCT) — 9; количество ретрансляторов (PTP) — 10; общая стоимость 10 000 у.е.)

Fig. 5. The optimal solution for balloon repeaters with a suspension height of 300 m (scale 1: 600; altitude 300 m; cost 1000 cu; the number of communication channels (KC) — 1; the number of radio stations (PCT) — 9; the number of repeaters (PTP) — 10; the total cost is 10 000 cu)

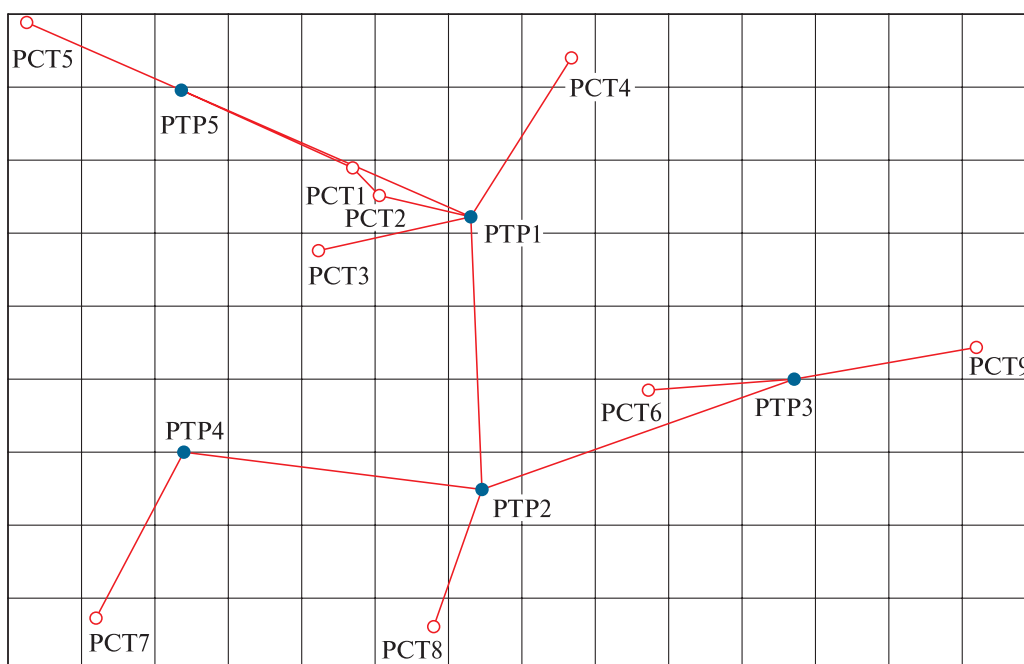


Рис. 6. Оптимальное решение для аэростатных ретрансляторов с высотой подвеса 1000 м (масштаб 1:600; высота 1000 м; стоимость 1500 у.е.; количество каналов связи (КС) — 1; количество радиостанций (PCT) — 9; количество ретрансляторов (PTP) — 5; общая стоимость 7500 у.е.)

Fig. 6. The optimal solution for balloon radios with a suspension height of 1000 m (scale 1: 600; altitude 1000 m; cost 1500 cu; the number of communication channels (KC) — 1; the number of radio stations (PCT) — 9; the number of repeaters (PTP) — 5; the total cost is 7500 cu)

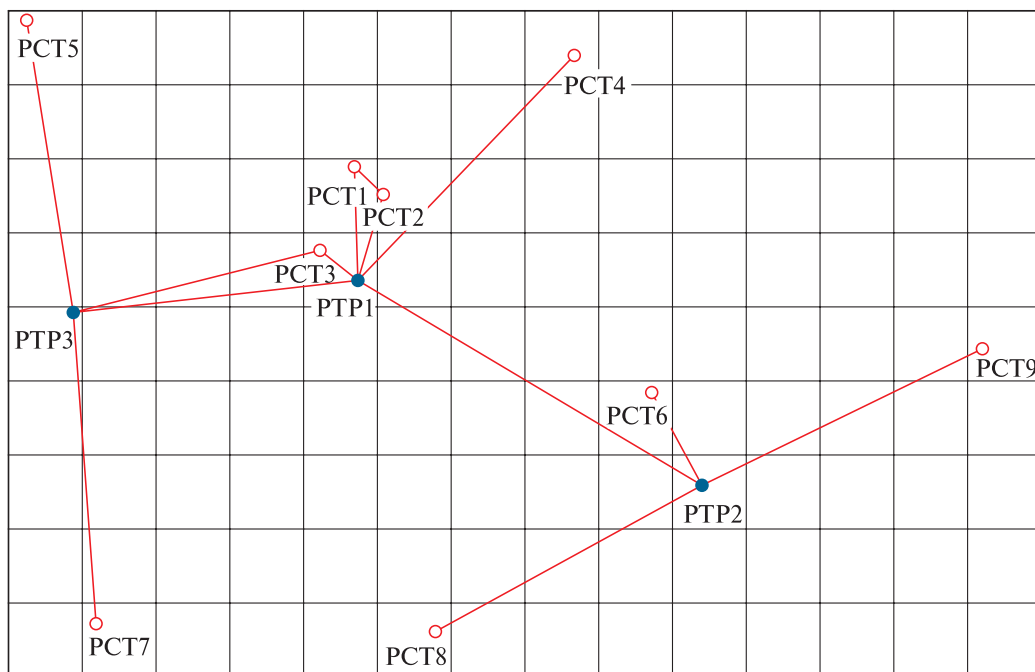


Рис. 7. Оптимальное решение для аэростатных ретрансляторов с высотой подвеса 3000 м (масштаб 1:600; высотность 3000 м; стоимость 10 000 у.е.; количество каналов связи (КС) — 1; количество радиостанций (PCT) — 9; количество ретрансляторов (PTP) — 3; общая стоимость 30 000 у.е.)

Fig. 7. The optimal solution for balloon repeaters with a suspension height of 3000 m (scale 1: 600; altitude 3000 m; cost 10 000 cu; the number of communication channels (KC) — 1; the number of radio stations (PCT) — 9; the number of repeaters (PTP) — 3; the total cost is 30 000 cu)

Выводы

1. Выбранный метод решения задачи построения беспроводных сетей в неподготовленных в отношении связи районах носит итеративный характер и относится к разделу методов нахождения оптимальных решений дискретной и комбинаторной оптимизации.

2. Программная реализация метода отражает относительную простоту поиска оптимального решения комбинаторными методами в сравнении с составлением системы функциональных зависимостей.

Список литературы

- [1] Уёмов А.И. Системный подход и общая теория систем. М.: Мысль, 1978. 272 с.
- [2] Месарович М., Такахара И.М. Общая теория систем: математические основы. М.: Мир, 1978. 311 с.
- [3] Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. М.: Наука, 1981. 488 с.
- [4] Карманов В.Г. Математическое программирование. М.: Наука, 1986. 288с.
- [5] Коршунов Ю.М. Математические основы кибернетики. М.: Энергоатомиздат, 1987. 496 с.
- [6] Волкова В.Н. Теория систем и системный анализ. СПб.: Изд-во политехнического ун-та, 2005. 72 с.
- [7] Волкова В.Н., Денисов А.А. Теория систем. М.: Высшая школа, 2006. 511 с.
- [8] Дмитриев А.Н. Введение в системный анализ. М.: МГУЛ, 2013. 48 с.
- [9] Дмитриев А.Н. Теоретико-множественное описание систем. М.: МГУЛ, 2012. 35 с.
- [10] Дмитриев А.Н., Максимов А.В., Блакитный О.А. Проблема построения единой автоматизированной системы воздушной радиосвязи региона // Материалы X Научно-технической конференции «Проблемы радиосвязи», Нижний Новгород: НПП «Полет», 1999. С. 93–100.
- [11] Дмитриев А.Н., Максимов А.В., Мотин О.В. Методический подход к оценке эффективности системы воздушной радиосвязи // Материалы VI Всероссийской науч.-техн. конф. «Повышение эффективности методов и средств обработки информации», Тамбов, 16–19 мая 2000 г. / ред. А.В. Коренная, Р.Ю. Диасамидзе. Тамбов: МСОИ, 2000. 341 с.
- [12] Дмитриев А.Н., Максимов А.В., Мотин О.В. Модель авиационного УКВ канала обмена данными // Материалы Рос. науч.-техн. конф. «Новые информационные технологии в связи и управлении», 24–26 апреля 2002 г., Калуга, КНИИТМУ. Калуга: ФГУП КНИИТМУ, 2002. 368 с.
- [13] Дмитриев А.Н., Мотин О.В. Методический подход к оптимизации авиационных сетей обмена данными // Материалы Рос. науч.-техн. конф. «Новые информационные технологии в системах связи и управления», 20–22 апреля 2004 г. Калуга, КНИИТМУ. Калуга: ФГУП КНИИТМУ, 2004. 307 с.
- [14] Дмитриев А.Н., Доброхотов А.В., Мотин О.В. Методические аспекты моделирования и оценки эффективности систем авиационной радиосвязи // Материалы Рос. науч.-техн. конф. «Новые информационные технологии в системах связи и управления», 20–22 апреля 2004 г. Калуга, КНИИТМУ. Калуга: ФГУП КНИИТМУ, 2004. 307 с.

- [15] Дмитриев, А.Н., Доброхотов А.В., Мотин О.В. Методика оценки эффективности сетей авиационной радиосвязи // Материалы Рос. науч.-техн. конф. «Новые информационные технологии в системах связи и управления», 20–22 апреля 2004 г. Калуга, КНИИТМУ. Калуга: ФГУП КНИИТМУ, 2004. 307 с.
- [16] Дмитриев А.Н., Максимов В.А., Кнауэр Г.Э. Оценка эффективности сетей воздушной радиосвязи при использовании различных алгоритмов многостанционного доступа // Материалы Рос. науч.-техн. конф. «Новые информационные технологии в связи и управлении», 24–26 апреля 2002 г. Калуга, КНИИТМУ. Калуга: ФГУП КНИИТМУ, 2002. 368 с.
- [17] Дмитриев А.Н., Доброхотов А.В., Мотин О.В. Методика оценки эффективности функционирования информационных сетей в интегрированных системах связи, навигации, идентификации // Сб. материалов 26-й Межрегиональной науч.-техн. конф. «Проблемы обеспечения эффективности и устойчивости функционирования сложных технических систем» / под ред. Ю.А. Романенко. Серпухов: ВИ РВ, 2007. 340 с.
- [18] Дмитриев А.Н., Доброхотов А.В., Мотин О.В. Методы моделирования и оценки эффективности авиационных сетей информационного обмена. Щелково: 30 ЦНИИ МО, 2009. 254 с.
- [19] Дмитриев А.Н., Толмачев В.И., Гайдамак В.М. Предложения по повышению эффективности системы связи объединения ВВС на основе применения ретрансляторов на различных летно-подъемных средствах // Материалы X науч.-техн. конф. «Проблемы радиосвязи». Нижний Новгород: НПП «Полеет», 1999. С. 108–119.
- [20] Дмитриев А.Н., Литвяк Ю.И. Метод оптимального размещения аэростатных ретрансляторов связи // Вестник МГУЛ – Лесной вестник, 2015, № 3 (101). С. 75–79.

Сведения об авторах

Дмитриев Александр Никитович — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), caf-sau@mgul.ac.ru

Есаков Виталий Анатольевич — канд. техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), caf-sau@mgul.ac.ru

Уткин Георгий Степанович — канд. техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), caf-sau@mgul.ac.ru

Сумельтинов Виктор Николаевич — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), caf-sau@mgul.ac.ru

Литвяк Юрий Иванович — аспирант МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), caf-sau@mgul.ac.ru

Стогов Михаил Юрьевич — ст. инженер ЦНИИ ВВС МО РФ, caf-sau@mgul.ac.ru

Поступила в редакцию 19.04.2019.

Принята к публикации 15.07.2019.

THE CONSTRUCTION OF WIRELESS COMMUNICATION NETWORK AT THE COMMUNICATION UNPREPARED AREAS

A.N. Dmitriev¹, V.A. Esakov¹, G.S. Utkin¹, V.N. Sumeltinov¹,
Y.I. Litvyak¹, M.Y. Stogov²

¹BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

²Central Research Institute of the Air Force of the Ministry of Defense of the Russian Federation, 2–5, Aerodromnaya st., 141103, Schelkovsky district, Schelkovo city, Moscow reg., Russia

alexndmitriev007@yandex.ru

The issue of optimal placement of balloon radios to build a wireless communication network is considered. A method for solving this problem is proposed, based on the sequential linking of the initial network graph by aerostat repeaters of various heights and costs. The results are compared and the most effective of them is selected. The type of repeaters is recognized as the best, which can ensure complete connectivity of the initial graph of the network with minimal costs, expressed in the total cost of the required number of balloon radios. An algorithm for finding the optimal solution, implemented in the Python 2.7 programming language, is presented. The type of balloon repeater that is optimal for the initial data is determined, and the process of its search is described.

Keywords: wireless communication network, balloon, optimization

Suggested citation: Dmitriev A.N., Esakov V.A., Utkin G.S., Sumeltinov V.N., Litvyak Y.I., Stogov M.Y. *O postroenii seti besprovodnoy svyazi v nepodgotovlennyykh v otnoshenii svyazi rayonakh* [The construction of wireless communication network at the communication unprepared areas]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 4, pp. 117–124. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-117-124

References

- [1] Uyomov A.I. *Sistemnyy podkhod i obshchaya teoriya sistem* [Systems approach and general systems theory]. М.: Mysl', 1978, 272 p.
- [2] Mesarovich M., Takahara I. M. *Obshchaya teoriya sistem: matematicheskie osnovy* [The general theory of systems: mathematical foundations]. Moscow: Mir, 1978, 311 p.
- [3] Moiseev N.N. *Matematicheskie zadachi sistemnogo analiza* [Mathematical problems of system analysis]. Moscow: Nauka [Science], 1981, 488 c.
- [4] Karmanov V.G. *Matematicheskoe programmirovaniye* [Mathematical programming]. Moscow: Nauka [Science], 1986, 288p.
- [5] Korshunov Yu.M. *Matematicheskie osnovy kibernetiki* [Mathematical foundations of cybernetics]. Moscow: Energoatomizdat, 1987, 496 p.
- [6] Volkova V.N. *Teoriya sistem i sistemnyy analiz* [System theory and system analysis]. St. Petersburg: Izd-vo politekhnicheskogo un-ta [Polytechnic University Press], 2005, 72 p.
- [7] Volkova V.N., Denisov A.A. *Teoriya sistem* [Systems Theory]. Moscow: Vysshaya shkola [Higher School], 2006, 511 p.
- [8] Dmitriev A.N. *Vvedeniye v sistemnyy analiz* [Introduction to system analysis]. Moscow: MGUL, 2013, 48 p.
- [9] Dmitriev A.N. *Teoretiko-mnozhestvennoye opisanie sistem* [The set-theoretic description of systems]. Moscow: MGUL, 2012, 35 p.
- [10] Dmitriev A.N., Maksimov A.V., Blakitnyy O.A. *Problema postroeniya edinoy avtomatizirovannoy sistemy vozduшной radiosvyazi regiona* [The problem of building a unified automated air radio communication system in the region] *Materialy X Nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Problemy radiosvyazi»* [Proceedings of the X Scientific-Technical Conference «Problems of Radio Communication»], Nizhny Novgorod NPP «Polet», 1999, pp. 93–100.
- [11] Dmitriev A.N., Maksimov A.V., Motin O.V. *Metodicheskiy podkhod k otsenke effektivnosti sistemy vozduшной radiosvyazi* [Methodical approach to assessing the effectiveness of the air radio communication system] *Materialy VI Vserossiyskoy nauch.-tekhn. konferentsii «Povysheniye effektivnosti metodov i sredstv obrabotki informatsii»* [Proceedings of the VI All-Russian Scientific-Technical Conference «Improving the efficiency of methods and means of information processing»], Tambov, May 16–19, 2000. Ed. Korennaya A.V., Diasamidze R.Yu. Tambov: MSOI, 2000, 341 p.
- [12] Dmitriev A.N., Maksimov A.V., Motin O.V. *Model' aviatsionnogo UKV kanala obmena dannymi* [Model of the aviation VHF data exchange channel] *Materialy Rossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Novye informatsionnye tekhnologii v svyazi i upravlenii»* [Proceedings of the Russian Scientific and Technical Conference «New Information Technologies in Communication and Management»], Kaluga, KNIITMU 2002, April 24–26, 2002 Kaluga: KNIITMU, 2002, 368 p.
- [13] Dmitriev A.N., Motin O.V. *Metodicheskiy podkhod k optimizatsii aviatsionnykh setey obmena dannymi* [Methodical approach to the optimization of aviation data exchange networks] *Materialy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Novye informatsionnye tekhnologii v sistemakh svyazi i upravleniya»* [Proceedings of the scientific and technical conference «New information technologies in communication and control systems»], Kaluga, KNIITMU, April 20–22, 2004. Kaluga: KNIITMU, 2004, 307 p.
- [14] Dmitriev A.N., Dobrokhotov A.V., Motin O.V. *Metodicheskie aspekty modelirovaniya i otsenki effektivnosti sistem aviatsionnoy radiosvyazi* [Methodical aspects of modeling and evaluating the effectiveness of aviation radio communication systems] *Sbornik materialov nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Novye informatsionnye tekhnologii v sistemakh svyazi i upravleniya»* [Collection of materials of the scientific and technical conference «New information technologies in communication and control systems»], Kaluga, KNIITMU, April 20–22, 2004. Kaluga: KNIITMU, 2004, 307 p.
- [15] Dmitriev, A.N., Dobrokhotov A.V., Motin O.V. *Metodika otsenki effektivnosti setey aviatsionnoy radiosvyazi* [Methods for assessing the effectiveness of aviation radio communication networks] *Sbornik materialov nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Novye informatsionnye tekhnologii v sistemakh svyazi i upravleniya»* [Collection of materials of the scientific and technical conference «New information technologies in communication and control systems»], Kaluga, KNIITMU, April 20–22, 2004. Kaluga: KNIITMU, 2004, 307 p.

- [16] Dmitriev A.N., Maksimov V.A., Knauer G.E. *Otsenka effektivnosti setey vozduшной radiosvyazi pri ispol'zovanii razlichnykh algoritmov mnogostantsionnogo dostupa* [Evaluation of the effectiveness of aeronautical radio networks using various multiple access algorithms] *Materialy Rossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Novye informatsionnye tekhnologii v svyazi i upravlenii»* [Proceedings of the Russian Scientific and Technical Conference «New Information Technologies in Communications and Management»], Kaluga, KNIITMU 2002, April 24–26, 2002. Kaluga: KNIITMU, 2002, 368 p.
- [17] Dmitriev A.N., Dobrokhotov A.V., Motin O.V. *Metodika otsenki effektivnosti funktsionirovaniya informatsionnykh setey v integrirovannykh sistemakh svyazi, navigatsii, identifikatsii* [Methods of assessing the effectiveness of the functioning of information networks in integrated communication, navigation, identification systems] *Sbornik materialov 26-y Mezhregional'noy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Problemy obespecheniya effektivnosti i ustoychivosti funktsionirovaniya slozhnykh tekhnicheskikh sistem»* [Collection of materials of the 26th Interregional Scientific and Technical Conference «Problems of ensuring the efficiency and sustainability of complex technical systems»]. Ed. Romanenko Yu.A. Serpukhov: VI RV, 2007, 340 p.
- [18] Dmitriev A.N., Dobrokhotov A.V., Motin O.V. *Metody modelirovaniya i otsenki effektivnosti aviatsionnykh setey informatsionnogo obmena* [Methods of modeling and evaluating the effectiveness of aviation information exchange networks]. Schelkovo: 30 TsNII MO [30 Central Research Institute of the Defense Ministry], 2009, 254 p.
- [19] Dmitriev A.N., Tolmachev V.I., Gaydamak V.M. *Predlozheniya po povysheniyu effektivnosti sistemy svyazi ob»edineniya VVS na osnove primeneniya retranslyatorov na razlichnykh letno-pod»emnykh sredstvakh* [Proposals to improve the efficiency of the communication system combining the Air Force based on the use of repeaters on various flight-lifting means] *Materialy Kh Nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Problemy radiosvyazi»* [Proceedings of the X Scientific-Technical Conference «Problems of Radio Communication»], Nizhny Novgorod: NPP «Polet», 1999, pp. 108–119.
- [20] Dmitriev A.N., Litvyak Yu.I. *Metod optimal'nogo razmeshcheniya aerostatnykh retranslyatorov svyazi* [Method of optimal placement of aerostat repeater communication]. *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*, 2015, no. 3 (101), pp. 75–79.

Authors' information

Dmitriev Aleksandr Nikitovich — Cand. Sci. (Tech.), Associated Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), caf-sau@mgul.ac.ru

Esakov Vitaliy Anatol'yevich — Cand. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), caf-sau@mgul.ac.ru

Utkin Georgiy Stepanovich — Cand. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), caf-sau@mgul.ac.ru

Sumeltinov Viktor Nikolayevich — Cand. Sci. (Tech.), Associated Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), caf-sau@mgul.ac.ru

Litvyak Yuriy Ivanovich — Postgraduate of the BMSTU (Mytishchi branch), caf-sau@mgul.ac.ru

Stogov Mikhail Yur'yevich — Senior Engineer of the Central Research Institute of the Air Force of the Ministry of Defense of the RF, caf-sau@mgul.ac.ru

Received 19.04.2019.

Accepted for publication 15.07.2019.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАДИАТОРОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ПОЛИМЕРАМИ

М.А. Караваев, Ю.В. Башкирцев

МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

makkaravaev@gmail.com

Охарактеризованы неисправности, возникающие в процессе работы радиатора охлаждения двигателя внутреннего сгорания. Приведен анализ классификации клеевых составов, применяемых при ремонте машин и разработан способ ремонта с помощью клеевых материалов.

Ключевые слова: сердцевина радиатора ДВС, полимерные составы, восстановление деталей машин и оборудования

Ссылка для цитирования: Караваев М.А., Башкирцев Ю.В. Восстановление радиаторов двигателей внутреннего сгорания полимерами // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2019. Т. 23. № 4. С. 125–133.

DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-125-133

Технический сервис машин и оборудования рассматривается как необходимое условие функционирования лесного хозяйства. Доля затрат на эксплуатацию и ремонт техники составляет более 45 %. Многие организации осуществляют обслуживание и ремонт техники своими силами в ремонтных мастерских общего назначения. Такой ремонт часто дороже, чем на специализированных ремонтных предприятиях, поэтому у хозяйств была необходимость в универсальных и недорогих материалах и технологиях ремонта, не требующих специализированного оборудования и высококвалифицированного персонала. Однако рыночные отношения практически искоренили такое понятие как дефицит запасных частей, что обусловило нецелесообразность восстановления простых в изготовлении деталей и, наоборот, — острую потребность в сложных деталях, в частности радиаторах двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Они обеспечивают оптимальный тепловой режим двигателя, нарушение которого приводит к снижению его мощности и экономичности и быстрому износу деталей. При перегреве происходит разложение и коксование масла, в двигателе, что ускоряет отложение нагара, вследствие чего ухудшается отвод тепла. Из-за расширения деталей уменьшается температурные зазоры, увеличиваются трение и их износ, ухудшается наполнение цилиндров.

Во время эксплуатации техники, какой бы совершенной ни была конструкция, надежность и другие ее свойства постоянно снижаются в связи с различными факторами, в результате появляются неисправности, которые приходится устранять, осуществляя техническое обслуживание и ремонт. Использование современных технологий и материалов позволяет восстанавливать радиаторы ДВС не только в специализированных ремонт-

ных предприятиях и мастерских, но и в мелких ремонтных мастерских, а при необходимости и в полевых условиях.

Цель работы

Целью настоящей работы является анализ классификации клеевых составов применяемых при ремонте машин и разработка способа ремонта с помощью клеевых материалов.

Материалы и методы

Одной из наиболее уязвимых деталей является радиатор охлаждения ДВС, дефекты которого представлены в табл. 1.

При проведении анализа дефектов радиатора, установлено, что больше всего дефектов приходится на сердцевину радиатора. Изучение отечественной продукции оборонного комплекса, ракетно-космической отрасли, полимерных составов, используемых в авиации, показало, что на основе отечественных компонентов можно создать необходимые для ремонта машин и оборудования материалы, не уступающие по качеству импортным клеевым материалам, которые будут недорогими, но эффективными для осуществления ремонта и восстановления техники, что послужит продлению ее срока службы и поддержанию в работоспособном состоянии.

Результаты и обсуждение

Известно два вида технологий ремонта: используемые в специализированных или общего назначения мастерских и в полевых условиях (рис. 1).

Эффективный ремонт сердцевины радиатора включает в себя использование полимерных материалов, которые добавляются в охлаждающую жидкость и формообразующие клеевые составы (табл. 2).

Т а б л и ц а 1

Причины и повторяемость дефектов сердцевины радиатора
Causes and recurrence of defects in the radiator core

Наименование дефекта	Основные причины появления дефекта	Коэффициент повторяемости
Внутреннее засорение	Накипь, инородные тела, ржавчина	0,4
Течь в трубах	Разрушение металла в результате длительной эксплуатации (коррозия); механические повреждения сердцевины	0,2
Наружное засорение сердцевины	Замасливание; загрязнение и засорение растительными остатками поверхности сердцевины	0,8
Трещины и обрывы опорных пластин	Отрыв мест опорных пластин к трубкам; коррозионное разрушение опорных пластин	0,2
Деформация опорных пластин	Погнутость и загибы краев опорных пластин сердцевины в результате небрежного демонтажа радиаторов, транспортирования и хранения	0,4
Механические повреждения сердцевины	Круговые следы задевания лопастями вентилятора трубок сердцевины; следы механических повреждений в виде вмятин и вырывов трубок сердцевин; зачеканка участков трубок в целях их заглушки с наружной стороны	0,5
Деформация охлаждающих пластин	Погнутости, смятие, местные смещения пластин, загибы наружных краев охлаждающих пластин в результате небрежной эксплуатации, механических повреждений сердцевин, транспортирования и хранения	0,6
Заглушка трубок	Устранение течи при техническом обслуживании	0,3
Смятие концов трубок	Небрежный монтаж, хранение и транспортирование радиатора	0,3



Рис. 1. Технологии восстановления работоспособности сердцевины радиатора
Fig. 1. Technologies for restoring performance of the radiator core

Рассмотрим классификацию клеевых составов, согласно которой можно определить необходимый для использования состав: анаэробный, термического отверждения и др. (рис. 2). Установлено, что для герметизации сердцевины радиатора целесообразно использовать клеевые составы, которые предусматривают введение отвердителя. Это позволяет получить не только клеевое соединение, но и сформировать конструкционный материал необходимой формы без его обработки. Такие материалы получили название формообразующих клеевых составов.

Несмотря на отсутствие единой теории адгезии, за счет подбора основы клея, его отвердителя и наполнителя можно оказывать эффективное воздействие на свойства клеевых составов и получать полимерные составы требуемых свойств.

Разработана технология ремонта радиатора ДВС, которая включает в себя следующие операции: очистку, продувку сжатым воздухом, укладку на поверхность деревянной подставки, укладки сверху резиновой прокладки, смазанной тонким слоем масла, а на нее укладку радиатора, заливки места течи формообразующим составом (табл. 3).

Анализ полимерных материалов для ремонта радиаторов двигателей внутреннего сгорания

Analysis of polymer materials for the repair of radiators of internal combustion engines

Наименование состава полимера	Преимущества	Недостатки
Герметик системы охлаждения Kuhler Dichter (LIQUI MOLY) 	Возможность использования со всеми видами присадок в систему охлаждения и с любыми антифризами	Герметизация небольших мест утечек в радиаторе; пористость металла в местах пайки; волосяные трещины
Порошковый герметик с алюминием STOP LEAK (GUNK) 	Полимеризация в местах протечек с формированием пробки и быстрой остановкой утечки в сердцевине радиатора. Эффективность как в воде, так и в растворах этиленгликоля	Отсутствие способности устранения больших механических повреждений; угроза закупорки трубок и полостей, имеющих малое сечение
Двухкомпонентный клей «Жидкий Металл» Chemical Metal (Loctite) 	Неподверженность воздействию пресной и соленой воды, масел, топлива; приспособленность к температуре до +1600 °C	Невозможность ремонта повреждений внутренних трубок радиатора и других труднодоступных повреждений
Набор для ремонта радиатора Quick Solder Radiator Repair (Permatex) 	Пригодность для ремонта радиаторов из стали, латуни и алюминия; устойчивость к воздействию воды и антифриза; отверждение в течение 60 мин	Задельвание небольших отверстий; невозможность ремонта повреждений внутренних трубок радиатора
Герметик радиатора «ЛЕКАРЬ» 	Высокая прочность и химическая стойкость к антифризу; уникальная химическая стабильность; устойчивость к воздействию углеводов	Ремонт только легкодоступных повреждений

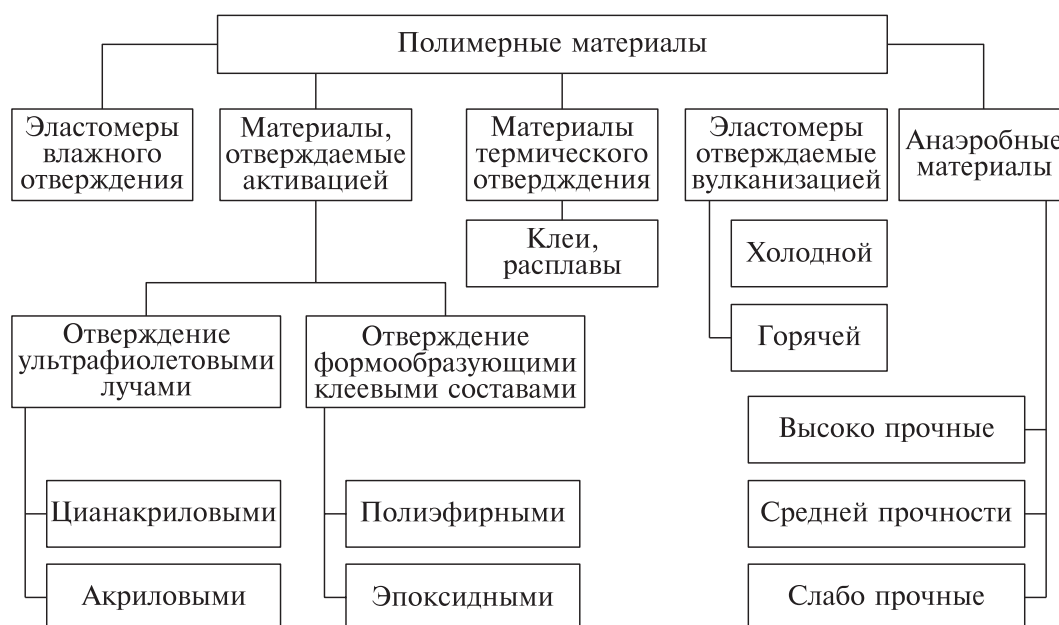


Рис. 2. Классификация полимерных материалов, используемых при ремонте техники
Fig. 2. Classification of polymer materials used in the repair of equipment

Т а б л и ц а 3 **Список литературы**
Технология ремонта радиатора
Radiator Repair Technology

Операция	Приспособление	Время работы, мин
Очистка	Моечный аппарат	4...5
Определение места дефекта	Ванна, компрессор	6...7
Продувка сжатым воздухом	Компрессор	2...3
Укладка на место течи резиновой прокладки смазанной маслом	Резиновая прокладка, масло	1
Расположение радиатора горизонтально на деревянной подставке	Деревянная подставка	1
Приготовление клеевого состава в соотношении: ЭД-20 — 28,3 %; ТЭТА — 13,3 %; алюминиевый порошок — 58,4 %	Мерный стакан, шпатель	3
Заливка места течи составом	Клеевой состав	1
Отверждение	$t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	24 ч.

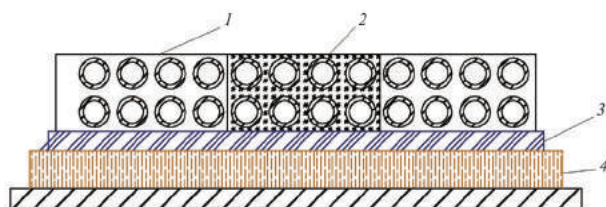


Рис. 3. Технология герметизации сердцевины радиатора двигателя внутреннего сгорания: 1 — радиатор; 2 — предполагаемое место течи, залитое формообразующим клеевым составом; 3 — резиновая прокладка, смазанная тонким слоем масла; 4 — деревянная подставка

Fig. 3. The technology of sealing the core of the radiator of an internal combustion engine: 1 — radiator; 2 — the supposed leak site, flooded with a forming adhesive; 3 — rubber spacer lubricated with a thin layer of oil; 4 — wooden stand

Преимущество такого способа состоит в том, что точное место течи определять не обязательно, так как запас площади радиатора составляет 15–20 % (рис. 3).

Выводы

Анализ полимерных составов для ремонта техники позволил сделать вывод о том, что невозможно иметь один или несколько универсальных составов, которые бы полностью удовлетворяли все потребности ремонта, а анализ свойств формообразующих полимерных составов показал, что их можно применять для ремонта радиаторов охлаждения.

- [1] Башкирцев Ю.В., Клубничкин Е.Е. Использование клеевых составов для восстановления деталей транспортно технологических машин лесопромышленных предприятий // Вестник МГУЛ – Лесной вестник, 2011. №5(81). С. 56–61.
- [2] Комаров Г.В. Соединения деталей из полимерных материалов. СПб.: Профессия, 2006. 592 с.
- [3] Башкирцев Ю.В. Техническое обслуживание и ремонт радиаторов. М.: РИАМА, 2013. 39 с.
- [4] Кочнова З.А., Жаворонок Е.С., Чалых А.Е. Эпоксидные смолы и отвердители: промышленные продукты. М.: Пейнт-Медиа, 2006. 199 с.
- [5] Башкирцев Ю.В., Голубев М.И., Быков В.В., Голубев И.Г. Типаж и эксплуатация технологического оборудования сервисных предприятий. М.: РИАМА, 2017. 110 с.
- [6] Петрова А.П. Термостойкие клеи. М.: Химия, 1977. 200 с.
- [7] Башкирцев Ю.В., Голубев И.Г., Голубев М.И. Эффективность использования нанотехнологии в техническом сервисе. М.: РИАМА, 2016. 47 с.
- [8] Мотовилин Г.В. Склеивание. Параллельный словарь-справочник. СПб.: Наука, 2000. 470 с.
- [9] Башкирцев Ю.В., Никишина О.С. Теоретические предпосылки использования формообразующих клеевых составов для технического сервиса АПК // Международный научный журнал, 2010. № 2. С. 15–18.
- [10] Темников В.Н., Нилов Н.И., Башкирцев В.И. Теоретические основы разработки и применения полимеров в техническом сервисе машин и оборудования. М.: РИАМА, 2010. 229 с.
- [11] Башкирцев Ю.В. Современные материалы для герметизации и фиксации деталей при техническом сервисе в АПК. М.: РИАМА, 2013. 36 с.
- [12] Юдин В.М. Очистка машин и оборудования при техническом сервисе. М.: РГАЗУ, 2015. 44 с.
- [13] Башкирцев Ю.В., Никишина О.С., Кручер И.Л. Особенности разработки формообразующих клеевых составов для технического сервиса автомобилей // Электротехнические и информационные комплексы и системы, 2010. № 3. Т. 6. С. 58–61.
- [14] Башкирцев Ю.В. Оптимизация концентрации клеевого состава с использованием компьютерной программы Statgraphics Plus для восстановления машин и оборудования. Технология и оборудование лесопромышленного производства // Науч. тр. МГУЛ, 2011. Вып. 356. С. 54–58.
- [15] Быков В.В., Голубев И.Г., Голубев М.И. Технология и организация восстановления деталей и сборочных единиц при сервисном обслуживании. М.: МГУЛ, 2014. 275 с.
- [16] Башкирцев Ю.В., Темников В.Н., Башкирцев В.И. Применение полимерных материалов при техническом обслуживании и ремонте машин. М.: МГУЛ, 2011. 229 с.
- [17] Еселев А.Д. Эпоксидные связующие для полимерных клеев // Клеи. Герметики. Технологии, 2005. № 3. С. 11–14.
- [18] Башкирцев В.И., Сликов А.Ф. Разработка термостойкого клеевого состава для ремонта системы выпуска отработанных газов с использованием компьютерной программы STATGRAPHICS // Международный технико-экономический журнал, 2015. № 3. С. 21–23.
- [19] Голубев И.Г., Голубев И.Г., Быков В.В. Перспективы применения полимерных нанокомпозитов // Техника и оборудование для села, 2012. № 1. С. 9–10.
- [20] Башкирцев Ю.В. Техническое обслуживание и ремонт радиаторов ДВС. М.: РИАМА, 2013. 39 с.

Сведения об авторах

Караваяев Максим Андреевич — студент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), makckaravaev@gmail.com

Башкирцев Юрий Владимирович — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 4022550@mail.ru

Поступила в редакцию 19.04.2019.

Принята к публикации 15.07.2019.

THE RESTORATION OF THE RADIATORS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES BY POLYMERS

M.A. Karavaev, Yu.V. Bashkircev

BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

makckaravaev@gmail.com

The article presents the faults arising in the process of radiator cooling of the internal combustion engine. The analysis of classification of adhesive compositions used in the repair of machines and developed a method of repair using adhesive materials.

Keywords: engine radiator core, polymer compositions, restoration of machine and equipment parts

Suggested citation: Karavaev M.A., Bashkircev Yu.V. *Vosstanovlenie radiatorov DVS polimerami* [The restoration of the radiators of internal combustion engines by polymers]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 4, pp. 125–133. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-125-133

Technical service of machinery and equipment is considered as a necessary condition for the forestry functioning. The share of the cost of operation and repair of equipment is more than forty-five percent. Many organizations carry out maintenance and repair of equipment on their own in General purpose repair shops. Lack of technologies and materials used in the conditions of farms, does not lead to savings on repairs and, ultimately, such repairs are often more expensive than specialized repair companies. Hence there is a need for universal and not expensive materials and repair technologies that do not require specialized equipment and highly qualified personnel. Market relations are virtually eradicated such a thing as a shortage of parts, which makes economically feasible the recovery is simple in the manufacture of parts and Vice versa, there is an urgent need for the restoration of complex parts, which are the radiators of internal combustion engines.

Radiators of internal combustion engines provide the necessary thermal mode of the engine, the violation of which leads to a decrease in power and efficiency of the engine and rapid wear of parts. When the engine overheats, decomposition and coking of the oil occurs, accelerating the deposition of carbon deposits, resulting in deteriorating heat dissipation. Due to the expansion of parts, temperature gaps decrease, friction and wear of parts increase, cylinder filling deteriorates.

The use of modern technologies and materials allows to restore the radiators of internal combustion engines not only in specialized repair plants and workshops, but also in the garages of small enterprises, and if necessary in the field.

During the operation of the equipment, no matter how perfect its design, its reliability and other properties are constantly reduced due to the influence of various factors, as a result there are malfunctions that have to be eliminated during maintenance and repair.

The article presents the faults arising in the process of operation of the radiator cooling of the internal combustion engine. The analysis of classification of adhesive compositions used in the repair of machines and developed a method of repair using adhesive materials.

One of the vulnerable parts is the engine cooling radiator, the defects of which are presented in table 1.

Analyzing the defects of the radiator, it is found that most of the defects occur at the core of the radiator.

Analysis of the domestic production of the defense complex, the missile and space industry, polymer compositions used in the aviation industry, shows that on the basis of domestic components, you can create materials of equal quality to imported adhesive materials necessary for the repair of machinery and equipment, which will provide not expensive, but effective impact on the repair and restoration of

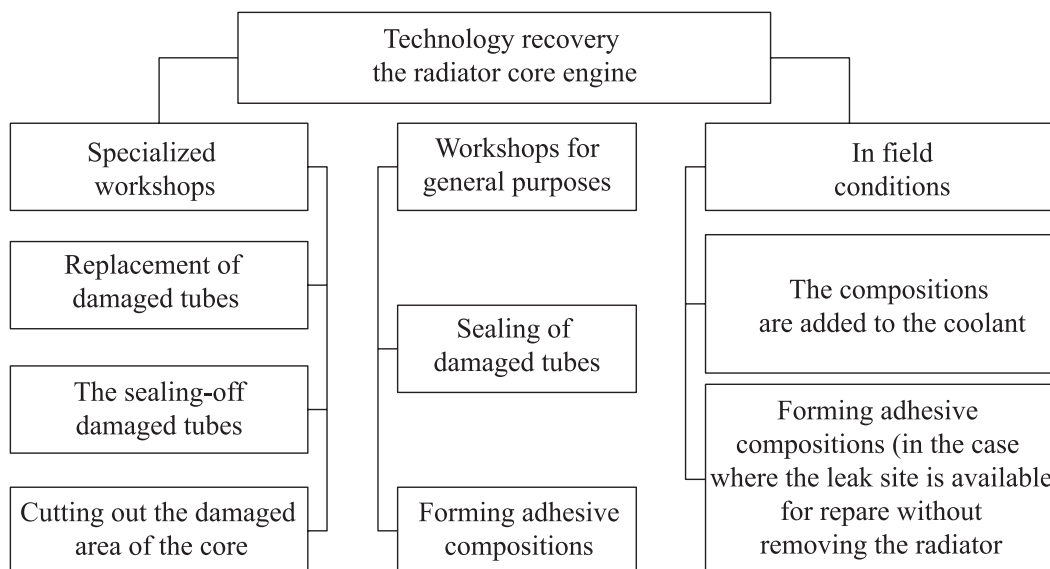


Fig. 1. Technologies for restoring performance of the radiator core

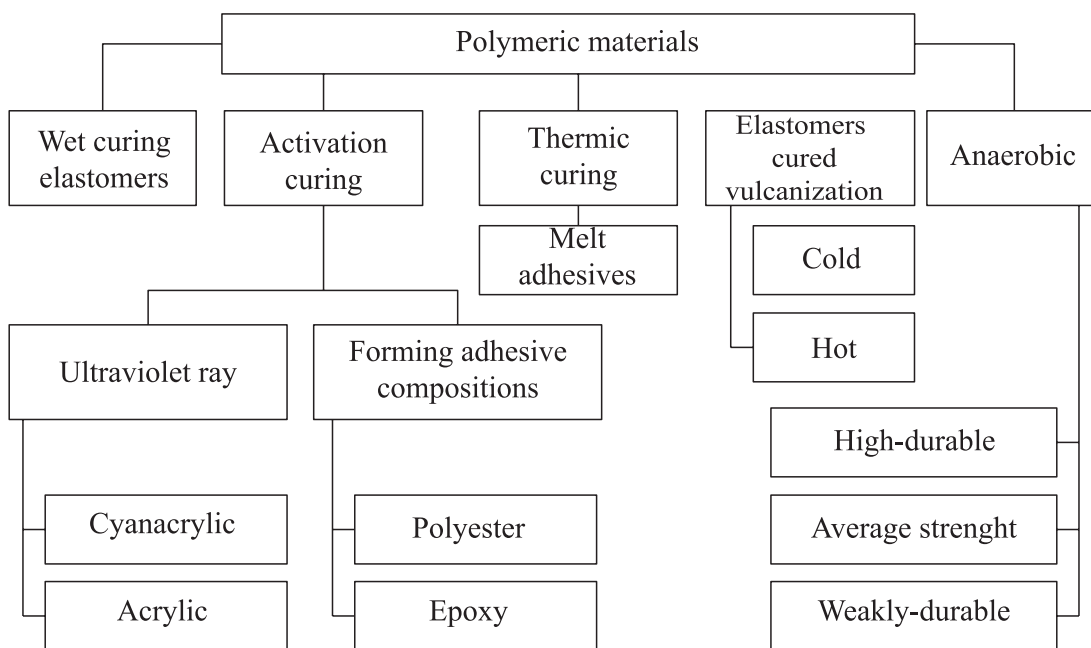


Fig. 2. Classification of polymer materials used in the repair of equipment

equipment that will serve the extension of its service life and maintain in working condition.

The analysis of existing repair technologies presented in figure 1 showed that the existing technologies are divided into technologies used in specialized workshops, General purpose workshops and in the field.

The most effective ways to repair the radiator core are the methods based on the use of polymeric materials, the analysis of which is presented in table 2.

The table shows the compositions (in the form of powder and liquid sealant) which are added to the coolant and forming adhesive compositions.

Analysis of adhesive compositions and their classification, presented in fig. 2, revealed that the repair

of machinery and equipment can be used anaerobic compositions, thermal curing compositions, elastomers cured by vulcanization, compositions cured by activation, elastomers wet curing. It was found that for sealing the radiator core, it is advisable to use adhesives curable by activation of which provide for the introduction of the hardener. The use of such compositions allows to obtain not only the adhesive compound, but also to form a structural material of the required shape without its processing. Such materials are called shape-generating adhesive compositions.

Analysis of the properties of formative polymer compositions based on epoxy resins and their components showed that despite the absence of a unified theory of adhesion, due to the selection of the ad-






Table 1

Causes and recurrence of defects in the radiator core

Name defect's	The main causes of the defect	Coefficient repeatabilitys
Internal blockage	Scale, foreign bodies, rust	0,4
Leak in pipes	Destruction of metal as a result of long-term operation (corrosion). Mechanical damage to the core	0,2
Outer core blockage	Oiling. Contamination and clogging of plant residues on the surface of the core	0,8
Support plate cracks and breaks	Separation of the support plates to the tubes. Corrosive destruction of the base plates	0,2
The deformation of the base plates	Curvature and bends of the edges of the core support plates as a result of careless dismantling of radiators, transportation and storage	0,4
Mechanical damage to the core	Circular marks of the fan blades touching the core tubes. Traces of mechanical damage in the form of dents and breaks of tubes of cores. Zachekanka sections of the tubes and their plugs from the outside	0,5
The deformation of the cooling plates	Curvature, crushing, local displacement of the plates, bends of the outer edges of the cooling plates as a result of careless operation, mechanical damage to the cores, transportation and storage	0,6
Tube plug	Elimination of maintenance leaks	0,3
The wrinkling of the ends of the tubes	Careless installation, storage and transportation of the radiator	0,3

Table 2

Analysis of polymer materials for the repair of radiators of internal combustion engines

Name composition's	Advantages	Disadvantages
Cooling system sealant Kuhler Dichter (LIQUI MOLY) 	The tool can be used with all kinds of additives in the cooling system and any antifreeze	Seals only small leaks in the radiator, the porosity of the metal in the places of soldering, hair cracks
Powdery sealant with aluminum STOP LEAK (GUNK) 	The compositions are polymerized in places of leaks, forming a plug and quickly stops the leak in the core of the radiator. The composition is equally effective in both water and ethylene glycol solutions	Not able to eliminate large mechanical damage and there is a threat of blockage of tubes and cavities with small cross-section
Two-component adhesive«Liquid metal» Chemical Metal (Loctite) 	Not exposed to fresh and salt water, oil, fuel. Withstands temperatures up to +1600°C	Does not allow to repair damages of internal tubes of a radiator, and also other hard-to-reach damages
Radiator repair kit Quick Solder Radiator Repair (Permatex) 	It is used in the repair of radiators made of steel, brass and aluminum. Resistant to water and antifreeze. Cured for 60 minutes	Seals small holes. Not possible to repair damage to the internal tubes of the radiator
Radiator sealer DOCTOR 	It has high strength and chemical resistance to antifreeze. It has a unique chemical stability, withstands the effects of hydrocarbons	Allows you to repair only easily accessible damage

hesive base, its hardener and filler, it is possible to have an effective effect on the properties of adhesive compositions and obtain polymer compositions of the required properties.

Table 3 presents the technology of repairing the radiator of the internal combustion engine, which

includes the following operations: cleaning, blowing out with compressed air, then placed on the surface of the wooden plate, placed on top of the rubber gasket lubricated with a thin layer of oil, it is placed in the radiator, then fill the leak forming composition.

Table 3
Radiator Repair Technology

Operations	Instruction and device	Time, min.
Clean	Washer	4–5
To determine the location of the defect	Bath, compressor	6–7
The compressed air	Compressor	2–3
In place of leaks put a rubber gasket lubricated with oil	Rubber gasket, oil	1
Place the radiator horizontally on a wooden stand	Wooden stand	1
Prepare the adhesive composition in the ratio: ЭД-20 — 28,3 %; ТЭТА — 13,3 %; Aluminium powder — 58,3 %	Measuring Cup, spatula	3
Fill the place of the leak composition	Adhesive composition	1
Curing	$t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	24 h.

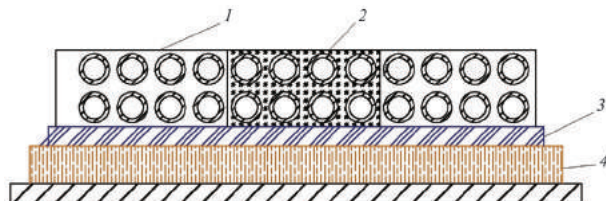


Fig. 3. Technology of sealing the core of the radiator engine: 1 — radiator; 2 — the expected place of the leak is filled with a formative adhesive composition; 3 — rubber strip lubricated with a thin layer of oil; 4 — wooden stand

The advantage of this method is that the exact location of the leak is not necessary to determine, as the reserve area of the radiator is 15–20 % (fig. 3).

Summing up, it should be noted that the analysis of polymer compositions for the repair of equipment made it possible to establish that it is impossible to have one or more universal compositions that would fully satisfy all the needs of repair. Analysis of the properties of forming polymer compositions showed that they can be used to repair cooling radiators.

References

[1] Bashkirtsev Yu.V., Klubnichkin E.E. *Ispol'zovanie kleevykh sostavov dlya vosstanovleniya detaley transportno tekhnologicheskikh mashin lesopromyshlennykh predpriyatiy* [The use of adhesive compositions for the restoration of parts of transport technological machines of timber industry enterprises]. Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik, 2011, no. 5 (81), pp. 56–61.
 [2] Komarov G.V. *Soedineniya detaley iz polimernykh materialov* [Connections of parts from polymeric materials]. St. Petersburg: Professiya [Profession], 2006, 592 p.
 [3] Bashkirtsev Yu.V. *Tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont radiatorov* [Maintenance and repair of radiators]. Moscow: RIAMA, 2013, 39 p.

[4] Kochnova Z.A., Zhavoronok E.S., Chalykh A.E. *Epoksidnye smoly i otverditeli: promyshlennye produkty* [Epoxyes and hardeners: industrial products]. Moscow: Peynt-Media [Paint Media], 2006, 199 p.
 [5] Bashkirtsev Yu.V., Golubev M.I., Bykov V.V., Golubev I.G. *Tipazh i ekspluatatsiya tekhnologicheskogo oborudovaniya servisnykh predpriyatiy* [Description and operation of technological equipment of service enterprises]. Moscow: RIAMA, 2017, 110 p.
 [6] Petrova A.P. *Termostoykie kleya* [Heat resistant glue]. Moscow: [Chemistry], 1977, 200 p.
 [7] Bashkirtsev Yu.V., Golubev I.G., Golubev M.I. *Effektivnost' ispol'zovaniya nanotekhnologii v tekhnicheskoy servise* [The effectiveness of the use of nanotechnology in technical service]. Moscow: RIAMA, 2016, 47 p.
 [8] Motovilin G.V. *Skleivanie. Parallelnyy slovar'-spravochnik* [Gluing. Parallel dictionary directory]. St. Petersburg: Nauka [Science], 2000, 470 p.
 [9] Bashkirtsev Yu.V., Nikishina O.S. *Teoreticheskie predposylki ispol'zovaniya formoobrazuyushchikh kleevykh sostavov dlya tekhnicheskogo servisa APK* [Theoretical prerequisites for the use of formative adhesive compositions for the technical service of the agroindustrial complex] *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal* [International Scientific Journal], 2010, no. 2, pp. 15–18.
 [10] Temnikov V.N., Nilov N.I., Bashkirtsev V.I. *Teoreticheskie osnovy razrabotki i primeneniya polimeroovv tekhnicheskoy servise mashin i oborudovaniya* [Theoretical foundations of the development and use of polymers in the technical service of machinery and equipment]. Moscow: RIAMA, 2010, 229 p.
 [11] Bashkirtsev Yu.V. *Sovremennye materialy dlya germetizatsii i fiksatsii detaley pri tekhnicheskoy servise v APK* [Modern materials for sealing and fixing parts during the technical service in the AIC]. Moscow: RIAMA, 2013, 36 p.
 [12] Yudin V.M. *Ochistka mashin i oborudovaniya pri tekhnicheskoy servise*. Moscow: RGAZU, 2015, 44 p.
 [13] Bashkirtsev Yu.V., Nikishina O.S., Krucher I.L. *Osobennosti razrabotki formoobrazuyushchikh kleevykh sostavov dlya tekhnicheskogo servisa avtomobiley* [Features of the development of formulating adhesive compositions for the technical service of automobiles] *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* [Electrotechnical and Informational Systems and Systems], 2010, no. 3, v. 6, pp. 58–61.
 [14] Bashkirtsev Yu.V. *Optimizatsiya kontsentratsii kleevogo sostava s ispol'zovaniem komp'yuternoy programmy Statgraphics Plus dlya vosstanovleniya mashin i oborudovaniya (nauchnaya stat'ya) Tekhnologiya i oborudovanie lesopromyshlennogo proizvodstva* [Optimization of the concentration of the adhesive composition using the computer program Statgraphics Plus for the restoration of machinery and equipment (scientific article) Technology and equipment for timber production] *Nauch. trudy MGUL* [Scientific. proceedings of MGUL], 2011, v. 356, pp. 54–58.
 [15] Bykov V.V., Golubev I.G., Golubev M.I. *Tekhnologiya i organizatsiya vosstanovleniya detaley i sborochnykh edinit pri servisnom obsluzhivanii* [Technology and organization of the restoration of parts and assembly units for service]. Moscow: MGUL, 2014, 275 p.
 [16] Bashkirtsev Yu.V., Temnikov V.N., Bashkirtsev V.I. *Primenenie polimernykh materialov pri tekhnicheskoy obsluzhivanii i remonte mashin* [The use of polymeric

- materials in the maintenance and repair of machines]. Moscow: MGUL, 2011, 229 p.
- [17] Eseev A.D. *Epoksidnye svyazuyushchie dlya polimernykh klevov* [Epoxy binders for polymeric adhesives] Klem. Germetiki. Tekhnologii [Clem. Sealants. Technologies], 2005, no. 3, pp. 11–14.
- [18] Bashkirtsev V.I., Slivov A.F. *Razrabotka termostoykogo klevovogo sostava dlya remonta sistemy vypuska otrabotannykh gazov s ispol'zovaniem komp'yuternoy programmy STATGRAPHICS* [Development of heat-resistant adhesive for repairing the exhaust system using the STATGRAPHICS computer program] *Mezhdunarodnyy tekhniko-ekonomicheskiy zhurnal* [International Technical and Economic Journal], 2015, no. 3, pp. 21–23.
- [19] Golubev I.G., Bykov V.V. *Perspektivy primeneniya polimernykh nanokompozitsiy* [Prospects for the use of polymer nanocompositions] *Tekhnika i oborudovanie dlya sela* [Machinery and equipment for the village], 2012, no. 1, pp. 9–10.
- [20] Bashkirtsev Yu.V. *Tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont radiatorov DVS* [Maintenance and repair of engine radiators]. Moscow: RIAMA, 2013, 39 p.

Authors' information

Karavaev Maksim Andreevich — student of the BMSTU (Mytishchi branch), makckaravaev@gmail.com
Bashkirtsev Yuriy Vladimirovich — Cand. Sci. (Tech.), Associated Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), 4022550@mail.ru

Received 19.04.2019.
Accepted for publication 15.07.2019.

СОВРЕМЕННЫЕ МИКРОПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ДЕКОРАТИВНО-ЗАЩИТНЫХ ПЛЕНОК И ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.Н. Зарубина¹, В.А. Гоцина¹, А.Д. Цапалин¹, А.Н. Иванкин¹,
А.Н. Веревкин¹, А.А. Евстратова²

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

²ОАО ЦНИИБ, 141260, Московская область, пос. Правдинский, ул. Ленина, д. 15/1

zarubina@mgul.ac.ru

Рассмотрены принципы формирования защитных покрытий древесных материалов с использованием природных и синтетических полимеров. Показана взаимосвязь физико-химических свойств полимерных материалов и качества пленочных покрытий древесины. Для исследования были выбраны синтетические и натуральные лаки, растворимые в органических растворителях и водоразбавляемые композиции, а также покрытия с различным типом пленкообразователя разной химической природы и использовалась продукция итальянской компании SAYERLACK, немецкой фирмы OSMO, а также масловоск АНТА российского производства. Предложено использование полимерных микросфер, которые приводят к улучшению пропиточных свойств декоративно-защитных покрытий и бумаг. Для исследования возможности применения микросфер в производстве отделочных покрытий для древесно-композиционных материалов были выбраны микросферы марки Expancel компании «AkzoNobel» (Швеция). Представлены результаты исследования основных физико-механических показателей, полученных образцов бумаги. Показано, что обработка оптимальным составом, содержащим 5 % микросфер, приводит к улучшению пропиточных свойств декоративно-защитных бумаг, которые можно использовать в производстве пленок для отделки поверхности древесно-композиционных материалов.

Ключевые слова: древесина, полимеры, защитные покрытия, микросферы синтетических полимеров, декоративные бумаги

Ссылка для цитирования: Зарубина А.Н., Гоцина В.А., Цапалин А.Д., Иванкин А.Н., Веревкин А.Н., Евстратова А.А. Современные микрополимерные материалы для декоративно-защитных пленок и поверхностной обработки древесных материалов // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2019. Т. 23. № 4. С. 134–140. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-134-140

Древесина — природный материал с уникальными свойствами, который человечество использует с древних времен. Поскольку древесина состоит преимущественно из органических веществ, она подвергается разрушению вследствие воздействия различных факторов окружающей среды, в частности микроорганизмами. Продукты, образующиеся в результате таких процессов, снова включаются в кругооборот веществ [1–3]. Для защиты от внешних негативных факторов изделия из древесины окрашивают, но тогда она теряет свою уникальную текстуру и цвет, а также покрывают лаками, которые способствуют сохранению ее естественной красоты. В настоящее время на российском рынке представлены десятки производителей лакокрасочных материалов и тысячи марок различных лаков для отделки древесины, которые не только придают ей декоративные свойства, но и обеспечивают максимальную износостойкость благодаря лакокрасочному покрытию и, как следствие, придают изделиям практичность и долговечность.

Однако специфические свойства и особенности строения древесины часто требуют проведения дополнительных испытаний, связанных с составом лаковых композиций, с методами их

нанесения и т. д. [4, 5]. Кроме того, рассматривается возможность замены синтетических лаков, растворимых в органических растворителях, на экологически безопасные натуральные масла и лаки, изготовленные на водной основе [6–9].

В 1980 г. группой исследователей были созданы *полимерные микросферы*, нашедшие широкое применение в современной промышленности вследствие способности увеличиваться в размерах от 60 до 80 раз по сравнению с собственными без изменения массы, что делает их незаменимыми для многих сфер и различных целей [1, 2].

Микросферы представляют собой маленькие термопластичные частицы сферической формы, состоящие из капсул с заключенным в них газом или жидкостью (пропеллентов), с температурой кипения не выше температуры размягчения термопластичной полимерной оболочки. Полимерная оболочка микросфер синтезируется из этиленненасыщенных мономеров, в частности акрилонитрила и простого винилового эфира. При нагревании давление газа или испаряемой жидкости увеличивается, термопластичная капсула размягчается и объем микросфер значительно увеличивается [10]. Газ или пар при этом остается внутри сфер. Расширенные микросферы

могут иметь различные размеры в зависимости от назначения — от 20 до 150 мкм. Температура расширения составляет 80–190 °С [4, 11].

Микросферы получают суспензионным способом полимеризации исходных мономеров в среде пропеллентов в присутствии инициаторов. Размеры частиц суспензии определяют размеры конечных расширяющихся микросфер. Температура полимеризации — 50...80 °С, pH — 6–10. В качестве поверхностно-активных веществ (ПАВ), обеспечивающих протекание полимеризации таким образом, чтобы образовалась микросфера, применяют соли, оксиды или гидроксиды кальция, магния, бария, цинка, никеля или марганца, железа, алюминия, а также крахмал, метилцеллюлозу, карбоксиметилцеллюлозу, оксид кремния, коллоидные глины [12–14].

Микросферы в связи с возможностью придания изделию различных дополнительных преимуществ нашли широкое применение в различных областях промышленности: как вспенивающий агент в печатных красках, в материалах для защиты днища кузовов и герметиках для автомобильной промышленности, в производстве бумаги и картона для различных покрытий и обработки тканых и нетканых материалов. К тому же микросферы используются в эмульсионных взрывчатых веществах, в древесно-пластиковых композитных материалах, а также для создания трехмерных отпечатков на обоях, тканях, бумаге, полиэфирной пленке и т. д. Трехмерный эффект достигается в результате нагревания отпечатка до температуры, при которой микросферы начинают расширяться и вынуждают связующее вещество создавать поперечную связь. Микросферы можно использовать для создания бархатной поверхности или других эффектов [13].

Микросферы нашли применение при производстве искусственного мрамора, который приобретает все большую популярность в производстве сантехники и при создании столешниц, поскольку снижается удельный вес изделий и улучшается устойчивость материалов к циклическим воздействиям температуры [13, 15].

В производстве бумаги и картона микросферы применяются для увеличения объема, придания теплоизоляционных свойств и др. Введенные в бумажную массу микросферы расширяются при сушке бумажного полотна в сушильной части бумагоделательной машины (БДМ) и придают бумаге требуемую пухлость. Применяются микросферы и в различных технологических процессах: при пропитке, ламинировании, нанесении покрытий, распылении, формовке, литье под давлением и др.

В связи с важным значением использования современных полимерных материалов для обра-

ботки поверхности древесины, интерес составило установление взаимосвязи свойств микрокапсулированных форм полимеров и состояния древесных материалов.

Цель работы

Цель работы заключается в оценке корреляции физико-химических свойств микрополимерных материалов и в установлении особенностей формирования декоративно-защитных пленок и поверхностной обработки древесных материалов.

Методика эксперимента

Для исследования были выбраны синтетические и натуральные лаки, растворимые в органических растворителях, и водоразбавляемые композиции, покрытия с различным типом пленкообразователя и разной химической природы (табл. 1). Использовалась продукция итальянской компании SAYERLACK, немецкой фирмы OSMO, а также масловоск АНТА российского производства.

Т а б л и ц а 1

Технологические характеристики составов для защитных покрытий древесины
Technological parameters of the compositions for protective coatings of wood

Наименование состава	Сухой остаток, %	Время высыхания		Жизнеспособность, ч
		От пыли, мин	На отлипание, мин	
Нитроцеллюлозный самогрунтующийся лак SZ 48	30	5...8	15...20	Не ограничена
Нитроуретановый самогрунтующийся лак SU 29	28	5...7	15...25	4
Полиуретановый лак TZ 90	49	15	30...40	3
Полиуретановый лак TZ 62	38	20...25	35...40	2
Акриловый лак TZ 93	32	10...15	20...30	4
Акриловый лак TZ 13	25	10...15	20...30	4
Самогрунтующийся лак на водной основе AF 60	30	60	90	Не ограничена
Лак на водной основе AF 63	31	15	50	То же
Масло с твердым воском OSMO	96	30	60	То же
Масловоск АНТА	98	40	80	То же

Основные технологические характеристики микросфер

The main technological characteristics of the microspheres

Марка микросферы	Описание	Содержание твердых веществ, %	Плотность суспензий, кг/м ³	Средний размер частиц до расширения, мкм	Средний размер частиц после расширения, мкм
№ 1	Суспензия с добавкой NaCl, кремово-белого цвета, без особого запаха	40	1200	0,5	40
№ 2	Суспензия кремово-белого цвета, без особого запаха	44	1200	0,5	40

Твердость полученных поверхностей определяли по сопротивлению внешнего слоя лакокрасочного покрытия воздействию карандаша с грифелем определенной твердости. В результате испытания были установлены высокие показатели твердости покрытия у полиуретанового TZ 90 и акрилового лаков TZ 93, у поверхностей, обработанных натуральным маслом.

Для определения адгезии использовали метод решетчатого надреза. Лучшие значения были получены у покрытий на основе натуральных масел, лаков на водной основе AF 60, AF, полиуретановых лаков TZ 90, TZ 62 и нитролака SU 29 (причем края надрезов оставались полностью гладкими и ни один из квадратов решетки не отслоился).

При сравнении степени блеска исследуемых поверхностей измеряется относительное количество зеркально отраженного от поверхности света в общем отраженном световом потоке. Поскольку натуральные отделочные материалы наносятся растиранием по поверхности, степень блеска у них не определяли (поднятия ворса древесины не наблюдалось, шероховатости поверхности не было и не требовалась промежуточная шлифовка). Для остальных покрытий сравнивали степень блеска образующейся на стекле лаковой пленки со степенью блеска лака, наносимого на поверхность древесины [16].

Для исследования возможности применения микросфер в производстве отделочных покрытий для древесно-композиционных материалов были выбраны микросферы марки Expancel компании AkzoNobel (Швеция) (табл. 2).

Физико-химические характеристики сырья и материалов определяли по стандартным методикам, изложенным в стандартах на соответствующий вид продукции.

Результаты и обсуждение

Под высыханием лакокрасочных покрытий понимают процесс их отверждения в результате испарения летучих растворителей или химических реакций окисления, возможно, полимеризации. Время высыхания, необходимое для приобретения покрытием высокой степени твердости, при кото-

рой возможна его дальнейшая обработка, является важным технологическим фактором, потому что оно определяет время межоперационных выдержек и продолжительность всего операционного цикла отделки. У двухкомпонентных лаков время высыхания меньше почти в 2 раза, что является их существенным преимуществом перед лаками на водной основе и натуральными маслами.

Под жизнеспособностью понимают время, в течение которого лакокрасочный материал с введенным в него катализатором отверждения и другими добавками целевого назначения сохраняет рабочую вязкость и его можно наносить принятым способом на отделяемую поверхность. Низкой жизнеспособностью (2 ч) отличается полиуретановый лак TZ 62, причем время его высыхания несколько больше, чем у аналогичного лака марки TZ 90.

Важной характеристикой лаков является их вязкость, влияющая на качество пленки и на расход лакокрасочного материала. При повышении вязкости увеличивается толщина пленки, образуются неровности и возрастает расход лака. Если вязкость недостаточна, то высыхание покрытия замедляется, на вертикальных поверхностях возникают потеки, пленка получается очень тонкой, ее прочность снижается и увеличивается расход растворителя. Вязкость, требуемая для разных способов нанесения лаков, не одинакова. Под рабочей вязкостью материала подразумевают условную вязкость, при которой нанесение данного лакокрасочного материала наиболее целесообразно. Такие отделочные материалы, как масло с твердым воском OSMO и масловоск АНТА, рекомендуется наносить методом растирания по поверхности, например ветошью. Остальные используемые в исследовании лакокрасочные составы наносятся с помощью покрасочного пистолета. Рабочая вязкость лаковых составов должна находиться в пределах 30...45 с. При определении расхода растворителя было установлено, что для доведения растворов использованных акриловых лаков до рабочей вязкости требуется примерно на 30 % больше растворителя, чем для лаков на основе полиуретанов. Расход растворителя

Т а б л и ц а 3

Физико-механические показатели бумаг, пропитанных образцом № 1**Physical-mechanical properties of paper impregnated with sample No. 1**

Наименование показателя	Исходная бумага	Бумага, пропитанная образцом № 1, содержание сухого остатка, %		
		5	15	25
Масса бумаги площадью 1 м ² , г	72,4	73,8	90,6	104,2
Толщина, мкм	82	91	114	141
Разрушающее усилие, Н	30	23	23	30
Капиллярная впитываемость, мм	17	21	22	23
Гладкость, с	31	16	12	8

Т а б л и ц а 4

Физико-механические показатели бумаг, пропитанных образцом № 2**Physical and mechanical properties of paper impregnated with sample No. 2**

Наименование показателя	Исходная бумага	Бумага, пропитанная образцом № 2 с содержанием сухого остатка, %			Бумага, пропитанная образцом № 2 и подвергнутая температурной обработке, с содержанием сухого остатка, %		
		5	15	25	5	15	25
Масса бумаги площадью 1 м ² , г	72,4	75	106	107	73	80,6	81
Толщина, мкм	82	85	125	129	82	106	110
Разрушающее усилие, Н	30	27,5	27,5	29,5	23	30	30
Капиллярная впитываемость, мм	17	19	22	22	14	13	17
Гладкость, с	31	16	16	16	15	15	9

для нитроцеллюлозного самогрунтующегося лака SZ 48 оказался в 2 раза больше, чем для аналогичного лака марки SU 29, но последний относится к «обратимым» лакам, т. е. возможно его повторное использование после разбавления растворителем до нужной вязкости.

При дальнейших исследованиях влияния технологических характеристик лаков на свойства получаемых при отделке древесины покрытий были использованы породы как хвойной (сосна), так и лиственной древесины (дуб, орех американский), а также достаточно экзотическая порода — афроможия. Выбранные породы древесины отличаются анатомическим строением, следовательно, и технологией нанесения на них покрытий.

Эксплуатационные качества покрытий, получаемых после высыхания лакокрасочных материалов, определяются комплексом их физико-механических свойств: адгезией, твердостью и эластичностью, стойкостью к воздействию тепла, света, влаги и т. д. Эти свойства не остаются постоянными в течение всего периода эксплуатации покрытия, а непрерывно изменяются: относительно быстро в период образования пленки и медленно в период старения полимера (см. табл. 2). На них оказывают влияние условия нанесения, сушки и обработки, а также толщина и шероховатость покрытия. Шероховатость имеет, кроме того, самостоятельное значение, поскольку

определяет характер блеска, следовательно, и внешний вид покрытия.

При нанесении органорастворимых лаков на древесину, было замечено незначительное поднятие ворса, что было устранено легкой шлифовкой поверхности перед нанесением второго слоя лака. При использовании водорастворимых лаков поднятие ворса было сильнее, чем у органорастворимых. Это можно объяснить тем, что входящая в состав лаков вода, как полярная жидкость, вызывает набухание поверхности. В большей степени это наблюдается на хвойной древесине, так как она имеет анизотропное строение [10].

Была исследована возможность использования водной суспензии микросфер для поверхностной обработки декоративных бумаг в целях придания им повышенной впитывающей способности, поскольку размер микросфер и пор бумажного полотна находился в одних пределах. В качестве бумаги-основы была использована бумага марки Дуб Венге 140 (производитель — компания «Шаттдекор»).

В пропиточных составах содержание сухого остатка составляло 5, 15 и 25 %. После пропитки 15 и 25 %-ными составами на поверхности бумаги образовался слой белой пленки.

Затем полученные материалы были высушены при температуре 20 ± 2 °С на воздухе. Бумага, обработанная образцом № 2 (см. табл. 2), подверглась высокотемпературной обработке

на цилиндре с температурой поверхности 110–120 °С. После чего у образцов, обработанных составом, содержащим 15 и 25 % микросфер, произошла деформация бумажного полотна, ухудшились функциональные и эстетические свойства бумаги, что не позволяет в дальнейшем использовать ее для отделки поверхности древесных изделий.

После пропитки и сушки образцов бумаг проводились измерения основных физико-механических показателей (табл. 3 и 4). Из табл. 3 и 4 видно, что с увеличением содержания сухого вещества в пропиточных композициях от 5 до 25 % с образцами № 1 и № 2 масса бумаги увеличилась (от 2 до 44 %).

При незначительном увеличении массы бумаги ее толщина значительно возрастает, что подтверждает повышение пористости после введения микросфер.

Разрушающее усилие при растяжении является одним из значимых показателей, который характеризует прочность бумаг [5]. Как видно из табл. 2 и 3 после обработки составами с микросферами, разрушающее усилие бумаг несколько снижается (на 23 % — для образца № 1, от 2 до 8 % — для образца № 2), что объясняется разрывом межволоконных связей, образованных при формировании бумажного полотна, из-за увеличения расстояния между волокнами под действием расширяющихся микросфер. Но это значение не ниже требуемого показателя для последующей пропитки при получении пленок.

Также одним из важнейших показателей пропитанных бумаг является капиллярная впитываемость — высокая впитывающая способность по отношению к растворам пропиточных композиций. По данным табл. 3 и 4 можно сделать вывод, что с увеличением содержания сухого вещества в пропиточных композициях от 5 до 25 % увеличивается капиллярная впитываемость бумаг, высушенных на воздухе при температуре 20 ± 2 °С: для образца № 1 — на 23...35 %; для образца №2 — на 12...30 %. Но для бумаг, подвергнутых температурной обработке, этот показатель снижается на 18...23 %. Поэтому в дальнейших исследованиях предполагается вводить микросферы в состав самой пропиточной композиции на основе латексов марок (Лакротэн Э-021 и Лакротэн Э-64, производитель ООО ПКФ «Оргхимпром» г. Дзержинск Нижегородской области), испытания которых были проведены ранее [8, 9].

Выводы

Полученные данные доказывают, что обработка составом, содержащим 5 % микросфер, приводит к улучшению пропиточных свойств декоративно-защитных бумаг, которые можно использовать в производстве пленок для отделки поверхности древесно-композиционных материалов.

По результатам сравнительного анализа исследуемых покрытий, можно сделать вывод о том, что использование водоразбавляемых и воднодисперсионных композиций лакокрасочного назначения, а также натуральных масел и воска позволяет получать поверхности покрытий высокого качества. Их применение снижает пожароопасность и токсичность производства по сравнению с лаками на органических растворителях. Кроме того, при нанесении масла на поверхность древесины ее поры остаются открытыми и покрытие «дышит». Древесина — натуральный материал и для ее отделки следует использовать природные экологически безопасные составы.

Список литературы

- [1] Kaur H., Sharma J., Jindal D., Arva R.K. Ahuja S.K., Arva S.B. Crosslinked polymer doped binary coatings for corrosion protection // *Progress in organic coating*, 2018, v. 125, no. 12, pp. 32–39.
- [2] Рыбин Б.М., Завражнова И.А., Рыбин Д.Б., Мартынов А.А., Реутова М.Г. Соотношение вкладов единичных функциональных групп и химических структурных звеньев в аддитивные мольные функции полимеров для деревообработки // *Деревообрабатывающая промышленность*, 2018. № 3. С. 39–50.
- [3] Неклюдов А.Д., Иванкин А.Н., Бердудина А.В. Основы биохимической переработки животного и комбинированного сырья. М.: ВНИИМП, 2003. 116 с.
- [4] Кононов Г.Н. Дендрохимия. Химия, нанохимия и биохимия компонентов клеток, тканей и органов древесных растений. В 2 т. М.: МГУЛ, 2015. Т. I. 480 с.
- [5] Neklyudov A.D., Ivankin A.N., Berdudina A.V. Properties and uses of protein hydrolysates. Review // *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2000, v. 36, no. 5, pp. 533–534.
- [6] Кононов Г.Н., Федотов А.А., Угрюмов С.А. Химические процессы, протекающие при горячем прессовании в структуре древесно-стружечных плит на основе фурфуролацетонного мономера ФА // *Вестник Поволжского государственного университета. Сер. Лес. Экология. Природопользование*, 2013. № 3 (19). С. 65–71.
- [7] Кононов Г.Н., Угрюмов С.А., Федотов А.А. Химическое взаимодействие древесных частиц со связующим на основе фуранового олигомера в структуре древесно-стружечных плит // *Энциклопедия инженера-химика*, 2014. № 1. С. 24–26.
- [8] Tarasov S.M., Ivankin A.N. Preparation Of Nano Micro Dispersions Of Modified Carbamide Formaldehyde Oligomers Of Enhanced Stability // *Scientific Israel – Technological Advantages*, 2018, t. 20, no. 3, pp. 25–32.
- [9] Горбачева Г.А., Иванкин А.Н., Санаев В.Г., Агеев А.К., Кирюхин Д.П., Кичигина Г.А., Куш П.П., Бадамшина Э.Р. Поверхностная модификация целлюлозосодержащих материалов растворами теломеров тетрафторэтилена // *Журнал прикладной химии*, 2017. Т. 90. № 8. С. 1104–1110.
- [10] Зарубина А.Н., Иванкин А.Н., Евстратова А.А. Применение микросфер в производстве декоративно-защитных пленок для отделки древесных материалов // *Proceedings of the International scientific and practical conference «Forest complex today, view of young researchers: forest industry and engineering, landscape architecture, woodworking*

- technology, management and economics», USA, Saint-Louis, 16 January, 2017. Saint-Louis: Publ. House Science and Innovation Center, Ltd, 2017, pp. 162–165.
- [11] Азаров В.И., Винославский В.А., Зарубина А.Н., Любавина И.В. Применение синтетических латексов для получения пленок на основе бумаг // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник, 2016. Т. 20. № 2. С. 10–14.
- [12] Корбертт С. Новейшая иллюстрированная энциклопедия: работы по дереву / пер. с англ. Ю. Суслова. М.: АСТ. Астрель, 2010. 512 с.
- [13] Заец С. Знакомьтесь с промышленным сырьем будущего – полимерные микросферы Expancel. URL: <http://analytic.ub.ua/ru/21676-znakomtes-s-promyshlennym-syrem-budushchego-polimernye-mikrosfery-expancel.html>. (дата обращения 12.12.2018 г.)
- [14] Техническая презентация микросфер Expancel. URL: [http://deltachem.ru/d/401471/d/expancel_technical-presentation_\(russian\).pdf](http://deltachem.ru/d/401471/d/expancel_technical-presentation_(russian).pdf). (дата обращения 08.12.2018 г.)
- [15] Нордин О., Ньюхольм К. Микросферы. Пат. 2432202 РФ. МПК В01J13/14. Заявитель и патентообладатель АКЦО НОБЕЛЬ Н.В. Заявл. 16.05.2007. № 2008148145/05. Опубл. 27.10.2011. Бюлл. № 30.
- [16] Шевляков А.А., Гранкин А.Ю., Зарубина А.Н., Покатило Е.М., Елисеев П.С. Использование отходов производства металлизированной бумаги // Материалы III Междунар. науч.-техн. конф. «Леса России: политика, промышленность, наука, образование», Санкт-Петербург, СПбГЛТУ, 23–24 мая 2018 г. / Под редакцией В.М. Гедьо. СПб.: СПбГЛТУ, 2018. С. 250–253.

Сведения об авторах

Зарубина Анжелла Николаевна — канд. техн. наук, доцент кафедры химии и химических технологий лесного комплекса МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), zarubina@mgul.ac.ru

Гоцина Виолетта Александровна — студент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), vita.vilita@mail.ru

Цапалин Александр Дмитриевич — студент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), sansan_99@mail.ru

Иванкин Андрей Николаевич — д-р хим. наук, профессор кафедры химии и химических технологий лесного комплекса МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), aivankin@mgul.ac.ru

Веревкин Алексей Николаевич — канд. техн. наук, доцент кафедры химии и химических технологий лесного комплекса МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), verevkin@mgul.ac.ru

Евстратова Анастасия Александровна — научный сотрудник ОАО ЦНИИБ evstratova@mgul.ac.ru

Поступила в редакцию 19.04.2019.

Принята к публикации 15.07.2019.

MODERN MICROPOLYMERIC MATERIALS FOR DECORATIVE-PROTECTIVE FILMS AND SURFACE TREATMENT OF WOOD MATERIALS

A.N. Zarubina¹, V.A. Gotsina¹, A.D. Tsapalin¹, A.N. Ivankin¹,
A.N. Verevkin¹, A.A. Evstratova²

¹BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

²Central Paper Research Institute, 15/1, Lenin st., 141260, p. Pravdinsky, Moscow reg., Russia

zarubina@mgul.ac.ru

The article discusses the principles of the formation of protective coatings of wood materials using natural and synthetic polymers. The relationship between the physicochemical properties of polymeric materials and the quality of wood film coatings is shown. For the study, synthetic and natural varnishes, soluble in organic solvents and water-soluble compositions, as well as coatings with different types of film-forming agent and different chemical nature were chosen. The products of the Italian company SAYERLACK, the German company OSMO, as well as maslovos ANTA of Russian origin were used. It is proposed to use polymer microspheres, which lead to an improvement in the impregnating properties of decorative protective papers. To study the possibility of using microspheres in the production of finishing coatings for wood-composite materials, microspheres of Expancel brand from AkzoNobel (Sweden) were chosen. The results of the study of the main physicomechanical indicators obtained paper samples are presented. It is shown that the treatment with a composition containing 5 % of microspheres leads to an improvement in the impregnating properties of decorative protective papers, which can be used in the production of films for finishing the surface of wood-composite materials.

Keywords: wood, polymers, protective coatings, microspheres of synthetic polymers, decorative papers

Suggested citation: Zarubina A.N., Gotsina V.A., Tsapalin A.D., Ivankin A.N., Verevkin A.N., Evstratova A.A. *Sovremennye mikropolimernye materialy dlya dekorativno-zashchitnykh plenok i poverkhnostnoy obrabotki drevesnykh materialov* [Modern micropolymeric materials for decorative-protective films and surface treatment of wood materials]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 4, pp. 134–140. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-134-140

References

- [1] Kaur H., Sharma J., Jindal D., Arva R.K., Ahuja S.K., Arva S.B. Crosslinked polymer doped binary coatings for corrosion protection // *Progress in organic coating*, 2018, v. 125, no. 12, pp. 32–39.
- [2] Rybin B.M., Zavrazhnova I.A., Rybin D.B., Martynov A.A., Reutova M.G. *Sootnoshenie vkladov edinichnykh funktsional'nykh grupp i khimicheskikh strukturnykh zven'ev v additivnye mol'nye funktsii polimerov dlya derevoobrabotki* [The ratio of the contributions of single functional groups and chemical structural units to the additive molar functions of polymers for woodworking] *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* [Woodworking industry], 2018, no. 3, pp. 39–50.
- [3] Neklyudov A.D., Ivankin A.N., Berdutina A.V. *Osnovy biokhimicheskoy pererabotki zhitovno i kombinirovannogo syr'ya* [Basics of biochemical processing of animal and combined raw materials]. Moscow: VNIIMP, 203, 116 p.
- [4] Kononov G.N. *Dendrokimiya. Khimiya, nanokhimiya i biogeokhimiya komponentov kletok, tkaney i organov drevesnykh rasteniy. V 2 tomakh* [Dendrochemistry. Chemistry, nanochemistry and biogeochemistry of cell components, tissues and organs of woody plants. In two volumes]. Moscow: MGU Publishing House, 2015, t. I, 480 p.
- [5] Neklyudov A.D., Ivankin A.N., Berdutina A.V. Properties and uses of protein hydrolysates. Review. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2000, v. 36, no. 5, pp. 533–534.
- [6] Kononov G.N., Fedotov A.A., Ugryumov S.A. *Khimicheskie protsessy, protekayushchie pri goryachem pressovanii v strukture drevesno-struzhechnykh plit na osnove furfuroletsetonovogo monomera FA* [Chemical processes occurring during hot pressing in the structure of chipboard based on furfural acetone monomer FA] *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* [Bulletin of the Povolzhsk State University. Series: Forest. Ecology. Nature management], 2013, no. 3 (19), pp. 65–71.
- [7] Kononov G.N., Ugryumov S.A., Fedotov A.A. *Khimicheskoe vzaimodeystvie drevesnykh chastits so svyazuyushchim na osnove furanovogo oligomera v strukture drevesno-struzhechnykh plit* [Chemical interaction of wood particles with a binder based on a furan oligomer in the structure of chipboard boards] *Entsiklopediya inzhenera-khimika* [Encyclopedia of a Chemical Engineer], 2014, no. 1, pp. 24–26.
- [8] Tarasov S.M., Ivankin A.N. Preparation Of Nano Micro Dispersions Of Modified Carbamide Formaldehyde Oligomers Of Enhanced Stability // *Scientific Israel – Technological Advantages*, 2018, t. 20, no. 3, pp. 25–32.
- [9] Gorbacheva G.A., Ivankin A.N., Sanaev V.G., Ageev A.K., Kiryukhin D.P., Kichigina G.A., Kushch P.P., Badamshina E.R. *Poverkhnostnaya modifikatsiya tsellyulozosoderzhashchikh materialov rastvorami telomerov tetraftoretilena* [Surface modification of cellulose-containing materials with tetrafluoroethylene solutions of telomers] *Zhurnal prikladnoy khimii* [J. of Applied Chemistry], 2017, v. 90, no. 8, pp. 1104–1110.
- [10] Zarubina A.N., Ivankin A.N., Evstratova A.A. *Primenenie mikrosfer v proizvodstve dekorativno-zashchitnykh plenok dlya otdelki drevesnykh materialov* [The use of microspheres in the production of decorative protective films for the finishing of wood materials]. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Forest complex today, view of the young researchers: forestry and woodworking technology, management, economics», USA, Saint-Louis, 16 January, 2017. Saint-Louis: Publ. House Science and Innovation Center, Ltd, 2017, pp. 162–165.
- [11] Azarov V.I., Vinoslavskiy V.A., Zarubina A.N., Lyubavina I.V. *Primenenie sinteticheskikh lateksov dlya polucheniya plenok na osnove bumag* [The use of synthetic latexes to produce films based on papers] *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*, 2016, v. 20, no. 2, pp. 10–14.
- [12] Corbert S. *Noveyshaya illyustrirovannaya entsiklopediya: raboty po derevu* [The newest illustrated encyclopedia: woodwork], ed. by Y. Suslov. Moscow: AST-Astrel, 2010, 512 p.
- [13] Zaets S. *Znakom'tes' s promyshlennym syr'em budushchego – polimernye mikrosfery Expancel* [Meet the industrial raw materials of the future – Expancel polymer microspheres]. Available at: <http://analitic.ub.ua/ru/21676-znakomtes-s-promyshlennym-syrem-budushchego-polimernye-mikrosfery-expancel.html>.
- [14] *Tekhnicheskaya prezentatsiya mikrosfer Expancel* [Technical presentation of Expancel microspheres]. Available at: [http://deltachem.ru/d/401471/d/expancel_technical-presentation_\(russian\).pdf](http://deltachem.ru/d/401471/d/expancel_technical-presentation_(russian).pdf) (accessed 08.12.2018)
- [15] Nordin O., Nyukhol'm K. *Mikrosfery. Pat. 2432202 RF* [Microspheres. Pat. 2432202 of the Russian Federation]. IPC B01J13 / 14. Applicant and patent holder of ASCO NOBEL N.V. Claims 05.16.2007, no. 2008148145/05, publ. 10.27.2011, bull. no. 30.
- [16] Shevlyakov A.A., Grankin A.Yu., Zarubina A.N., Pokatilo E.M., Eliseev P.S. *Ispol'zovanie otkhodov proizvodstva metallizirovannoy bumagi* [The use of waste production of metallized paper] *Materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Les Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie»* [Proceedings of the III International Scientific and Technical Conference «Forests of Russia: politics, industry, science, education»], St. Petersburg, St. Petersburg State Technical University, May 23–24, 2018. Ed. V.M. Gedyo. St. Petersburg: SPbGLTU, 2018, pp. 250–253.

Authors' information

Zarubina Angella Nikolaevna — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Department of Chemistry and Chemical Technologies of the Forest Complex of the BMSTU (Mytishchi branch), zarubina@mgul.ac.ru

Gotsina Violetta Aleksandrovna — student of the BMSTU (Mytishchi branch), caf-htdip@mgul.ac.ru

Tsapalin Aleksandr Dmitrievich — student of the BMSTU (Mytishchi branch), caf-chem@mgul.ac.ru

Ivankin Andrey Nikolayevich — Dr. Sci. (Chem.), Professor of the Department of Chemistry of the BMSTU (Mytishchi branch), aivankin@mgul.ac.ru

Verevkin Aleksey Nikolaevich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Department of Chemistry and Chemical Technologies of the Forest Complex of the BMSTU (Mytishchi branch), verevkin@mgul.ac.ru

Evstratova Anastasiya Aleksandrovna — Researcher of Central Paper Research Institute, evstratova@mgul.ac.ru

Received 19.04.2019.

Accepted for publication 15.07.2019.